

TRATAMENTO DE FUNDAÇÕES DA BARRAGEM DO ESCALÃO PRINCIPAL DO BAIXO SABOR

ANTÓNIO CRISTIANO MACHADO BRANDÃO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Professor Celso Manuel Relva Martins de Lima

Junho 2014

JANEIRO DE 2013

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2012/2013 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é o desfecho de um percurso académico que durou vários anos, que consumiu muitas horas de trabalho, teve momentos bons e momentos maus, e que não estaria concluído sem o apoio de várias pessoas a quem eu dou os meus agradecimentos:

Ao meu orientador, Professor Celso Lima, pela orientação, os conhecimentos transmitidos, a paciência necessária para me auxiliar a completar esta dissertação e pelo incentivo transmitido durante todo este tempo.

Ao professor Viana da Fonseca, que me lecionou Fundações, pela amizade e por me facultar informação importante para esta dissertação.

Ao professor Topa Gomes, que me lecionou Obras Subterrâneas, pelo apoio e amizade e por me autorizar a consulta de livros pessoais.

À EDP, por me ter transmitido a informação necessária e possível, que estava sempre tratada e apresentada de uma forma clara.

Aos meus pais, que sempre me apoiaram, pelos sacrifícios que fizeram por mim, e pela paciência que tiveram para que eu pudesse concluir esta jornada da minha vida.

À minha irmã, que sempre me apoiou e sempre esteve disponível para me auxiliar.

À minha namorada, pelos sacrifícios que fez e pela paciência que teve em me motivar nos momentos menos bons.

Aos meus avós, António Brandão e António Machado, que perdi durante o meu curso que estarão sempre presentes no meu coração, e a minha avó Marinha Machado que sempre me apoiou para que eu concluísse os meus estudos.

À minha restante família pelo apoio constante que me deram.

Aos meus colegas Pedro, Gonçalo, Patrícia, Rita e os restantes colegas de Geotecnia pelo companheirismo, amizade e companhia na “GeoSala” durante este ultimo ano.

Aos meus amigos de longa data Miguel, Diogo, Ricardo, Pedro e Luís pelo apoio incondicional e por todos os momentos partilhados ao longo destes anos.

A todos o meu mais profundo e sincero obrigado.

RESUMO

As fundações das barragens constituem uma unidade com a estrutura que suportam, devendo ser efetuado o estudo do conjunto barragem-fundação, já que a experiência tem mostrado que a segurança do conjunto é consideravelmente condicionada pela fundação. Devem então ser escolhidos os elementos definidores das características geométricas e físicas (mecânicas, hidráulicas, térmicas, etc.) do maciço de fundação e programadas as operações necessárias para melhorar o comportamento.

Nesta dissertação abordam-se as diferentes etapas do processo de tratamento das fundações de uma barragem, desde a caracterização do maciço rochoso e a conceção do tratamento até à execução dos trabalhos. Também se explicam e avaliam algumas metodologias de dimensionamento dos trabalhos de tratamento por injeções de calda de cimento.

Por fim, recorrendo aos conhecimentos previamente introduzidos, apresenta-se o caso de estudo do tratamento de fundações da barragem do escalão principal do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor.

PALAVRAS-CHAVE: barragens, tratamento de fundação, cortina de impermeabilização, consolidação de um maciço rochoso, injeções de cimento

ABSTRACT

The foundations of dams constitute a unit with the supporting structure, the study of the whole dam-foundation should be made, since experience has shown that the safety of the whole is considerably constrained by the foundation. The defining elements of the geometrical and physical characteristics (mechanical, hydraulic, thermal, etc.) of the rock foundation, should then be chosen and programmed with the necessary operations to improve it's behavior.

In this dissertation are addressed the different stages of the treatment process of the foundations of a dam, from the characterization of the rock mass and design of treatment until the execution of the work. It's also explained and evaluated some methods for the design of the grouting treatments.

Finally, using the knowledge previously introduced, we present the study case of the treatment of the foundations of the hydroelectric dam top flight of the Baixo Sabor.

KEY WORDS: dams, fundation treatment, grout curtains, rock mass consolidation, cement grout

Sumário

ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. GENERALIDADES.....	1
1.2. ENQUADRAMENTO DA DISSERTAÇÃO	3
2 TRATAMENTO DE FUNDAÇÕES	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. ELEMENTOS DO TRATAMENTO.....	5
2.2.1. CONSOLIDAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO.....	5
2.2.2. CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO	7
2.3. FATORES CONDICIONANTES NO TRATAMENTO	7
2.3.1. MATERIAL ROCHOSO	8
2.3.2. DIÁCLASES	9
2.3.3. FALHAS	10
2.3.4. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	10
2.4. TIPOS DE CALDA	10
2.5. INTERESSE DAS GALERIAS DE VISITA NOS TRATAMENTOS DE FUNDAÇÃO	11
3 DEFINIÇÃO DA CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO	13
3.1. DIMENSIONAMENTO	13
3.1.1. PROFUNDIDADE DA CORTINA	13
3.1.2. EXTENSÃO DA CORTINA.....	14
3.1.3. ESPAÇAMENTO E ORIENTAÇÃO DOS FUROS	14
3.1.4. PRESSÕES DE INJEÇÃO	16
3.2. PREVISÃO DO CONSUMO DE CALDA	17
3.3. CRITÉRIO DE FECHO DE INJEÇÃO	18
3.3.1. CONCEITO DE NEGA	19
3.3.2. CRITÉRIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	19
3.3.3. CRITÉRIO DA ABSORÇÃO DE CALDA	20
3.3.4. CRITÉRIO GEOLÓGICO	21
3.4. ENSAIO LUGEON	22

3.4.1.	EVOLUÇÃO DO ENSAIO TIPO LUGEON	24
3.4.2.	EXECUÇÃO DO ENSAIO LUGEON.....	25
3.4.3.	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	26
3.4.4.	LIMITAÇÕES DO ENSAIO LUGEON	31
3.5.	PROCEDIMENTO DE INJEÇÃO.....	31
3.5.1.	FASEAMENTO DAS INJEÇÕES	31
3.5.1.1.	DESCENDENTE SEM OBTURADOR	32
3.5.1.2.	DESCENDENTE COM OBTURADOR	33
3.5.1.3.	ASCENDENTE COM OBTURADOR.....	34
3.5.2.	DEFINIÇÃO DO COMPRIMENTO DOS TRECHOS	35
3.5.3.	DEFINIÇÃO DO ESPAÇAMENTO DOS FUROS	36
3.6.	CONTROLO DE QUALIDADE DAS MISTURAS.....	38
3.7.	DURABILIDADE DAS CORTINAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO	39
3.8.	DRENAGEM E PIEZOMETRIA	39
4	METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO	41
4.1.	MÉTODO DE HOULSBY.....	41
4.1.1.	NECESSIDADE DE TRATAMENTO	41
4.1.2.	COMO EXECUTAR AS INJEÇÕES.....	42
4.1.2.1.	CALDA DE CIMENTO.....	42
4.1.2.2.	PRESSÕES DE INJEÇÃO	44
4.1.2.3.	INSPEÇÕES PENETRANTES VS MOBILIZANTES.....	46
4.1.2.4.	EXECUÇÃO DAS INJEÇÕES	46
4.2.	MÉTODO DE GIN	47
4.2.1.	PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS.....	48
4.2.2.	ESCOLHA DA MISTURA.....	49
4.2.3.	O PARÂMETRO DE GIN.....	50
4.2.4.	VANTAGENS DE MANTER O PARÂMETRO DE GIN CONSTANTE.....	54
4.2.5.	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MÉTODO DE GIN.....	54
5	CASO DE ESTUDO – TRATAMENTO DE FUNDAÇÕES DA BARRAGEM DO ESCALÃO PRINCIPAL DO BAIXO SABOR	57
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM DO ESCALÃO PRINCIPAL DO BAIXO SABOR..	57

5.2.	ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO.....	59
5.3.	DEFINIÇÃO DO TRATAMENTO DE CONSOLIDAÇÃO	62
5.3.1.	CONSOLIDAÇÃO ESPECÍFICA NAS FALHAS A, B E C	62
5.3.2.	TRATAMENTO GENERALIZADO DE CONSOLIDAÇÃO	65
5.3.3.	LIGAÇÃO BETÃO-ROCHA NAS GALERIAS DE VISITA	67
5.3.4.	PROCEDIMENTOS.....	68
5.3.4.1.	FURAÇÃO	68
5.3.4.2.	LIMPEZA	68
5.3.4.3.	LAVAGEM	68
5.3.4.4.	INJEÇÃO	70
5.4.	CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO.....	71
5.5.	PROCEDIMENTOS COMPLEMENTARES.....	75
5.6.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	76
6	CONCLUSÕES	85
	BIBLIOGRAFIA	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Definição da orientação dos furos de uma cortina de impermeabilização (adaptado de Houlsby, 1990).....	15
Figura 2 – Exemplificação de uma orientação errada (à esquerda) e uma correta (à direita) da furação em relação a uma família de descontinuidades (adaptado de Houlsby, 1990)	15
Figura 3 – Relação entre a inclinação dos furos e a abertura das fendas (adaptado de Houlsby, 1990)	16
Figura 4 – Inclinação mais eficaz dos furos de injeção na presença de famílias de descontinuidades subverticais e subperpendiculares entre si (adaptado de Houlsby, 1990)	16
Figura 5 – Representação gráfica de (1) “prática europeia” e (2) “prática americana” (adaptado de Gama, 2012)	17
Figura 6 – Correlação entre absorção de água e calda (adaptado de Jawantzky in Ewert, 1985) 18	
Figura 7 – Ensaio Lugeon: a) obturador simples; b) – obturador duplo; c) obturador quádruplo (adaptado dos apontamentos da disciplina de Geologia da Engenharia, 2013)	23
Figura 8 – Curvas típicas obtidas através de ensaios Lugeon (adaptado dos apontamentos de Geologia da Engenharia, 2013).....	24
Figura 9 – Patamares típicos de pressão em percentagem de $P_{máx}$	25
Figura 10 – Interpretação dos resultados do ensaio Lugeon proposta por Quiñones-Rozo (2010)	29
Figura 11 – Representação esquemática da técnica descendente sem obturador segundo Houlsby (1990)	33
Figura 12 – Representação esquemática da técnica descendente com obturador segundo Houlsby (1990)	34
Figura 13 – Representação esquemática da técnica ascendente com obturador segundo Houlsby (1990)	35
Figura 14 – Exemplo de variação de condições ao longo de um furo (adaptado de Warner, 2004)	36
Figura 15 – Exemplo do faseamento de uma cortina com o método split-spacing (adaptado de Houlsby, 1990).....	37
Figura 16 – Exemplo de um prolongamento da furação causado por absorção elevada na proximidade (adaptado de Houlsby, 1990)	38
Figura 17 – Alteração nas subpressões provocada pelos drenos (Souza, 2013)	40

Figura 18 – Fluxograma para definição da necessidade de execução de cortina de impermeabilização (adaptado de Houlsby, 1990)	41
Figura 19 – Esquema para definição dos traços iniciais das caldas (modificado de Houlsby, 1990)	44
Figura 20 – Pressões de injeção admissíveis para diferentes tipos de rochas (adaptado de Houlsby, 1990)	45
Figura 21 – Evolução típica do consumo de calda com os 15 minutos adicionais depois de atingida a nega (adaptado de Houlsby, 1990)	47
Figura 22 – Exemplo do desenvolvimento da pressão durante a injeção em relação com o volume de calda absorvido (Lombardi, 1996)	50
Figura 23 – Exemplo de múltiplas interrupções num processo de injeção (Lombardi, 1996)	51
Figura 24 – Conjunto de curvas GIN padrão (adaptado de Lombardi, 1996)	52
Figura 25 – Bacia Hidrográfica do rio Sabor (Cedido pela EDP).....	57
Figura 26 – Planta geral do escalão de montante	58
Figura 27 – Extrato da folha 11-C da carta geológica de Portugal (Serviços Geológicos de Portugal (1989) – Carta Geologica de Portugal; Folha 11-C (Torre de Moncorvo). (Ferreira da Silva, Almeida Ribeiro e Ribeiro, 1989) (Cedido pela EDP) (adaptado por Gonçalves, 2011).....	60
Figura 28 – Planta estrutural da caracterização geológico-geotécnica realizado no maciço rochoso de fundação após escavações	61
Figura 29 – Cartografia geológico-geotécnica – localização das falhas A,B,C	62
Figura 30 – Esquema em planta da furação para tratamento das falhas A,B e C.....	64
Figura 31 – Representação da furação de consolidação em corte e em planta de corte longitudinal respetivamente.....	65
Figura 32 – Pormenor tipo de um perfil fictício do fundo do vale de furação de consolidação .	66
Figura 33 – Pormenor das injeções nas galerias de visita para a ligação betão-rocha	67
Figura 34 – Pormenor tipo de um perfil fictício de furação de impermeabilização	73
Figura 35 – Representação da furação de impermeabilização em alçado e em planta respetivamente.....	75
Figura 36 – Absorção de cimento em cada perfil de injeção de consolidação em Kg por metro de furo, representado num corte visto de jusante para montante da barragem	76
Figura 37 – Esquema resumo do tratamento de consolidação num dos perfis da Junta 13.....	77
Figura 38 – Esquema resumo do tratamento de consolidação num dos perfis da Junta 24.....	78
Figura 39 – Esquema resumo do tratamento de consolidação num dos perfis da Junta 18.....	79

Figura 40 – Injeções da cortina de impermeabilização da margem esquerda (vista de montante para jusante)	80
Figura 41 – Injeções da cortina de impermeabilização da margem direita (vista de montante para jusante)	81
Figura 42 – Injeções da cortina de impermeabilização no fundo do vale (vista de montante para jusante)	82
Figura 43 – Esquema resultante dos ensaios de cross-hole sísmico antes do tratamento (vista de jusante para montante)	83
Figura 44 – Esquema resultante dos ensaios de cross-hole sísmico depois do tratamento de consolidação (vista de jusante para montante)	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Envolventes de tratamentos por consolidação por injeções baseadas no incremento das tensões principais máximas (Elementos de projeto da Barragem do Alqueva, 1999)	6
Tabela 2 – Sistema de classificação proposto por Deere para furos primários (1976)	20
Tabela 3 – Critério de absorção de calda para furos secundários sugerido por Deere (1982)	21
Tabela 4 – Relação entre absorção hidráulica e as características das descontinuidades (Houlsby, 1976)	26
Tabela 5 – Interpretação dos resultados dos ensaios de Lugeon (proposto por Houlsby, 1976). 27	
Tabela 6 – Procedimento de interpretação do ensaio de Lugeon (proposto por Quiñones-Rozo, 2010)	30
Tabela 7 – Tipos de caldas de cimento a ensaiar	71
Tabela 8 – Quantidade total de furação e massa de cimento injetada para a impermeabilização	79

1.1. GENERALIDADES

O tratamento de fundações é um processo integrado na construção de qualquer barragem, em especial no caso de grandes barragens. O processo de escolha da localização geográfica de uma grande barragem começa pela definição da sua função, isto é, uma barragem cria uma albufeira e o fim desta pode ser para armazenamento de água às populações e agricultura ou então para fins de produção de energia.

Estando a função da barragem definida, segue-se uma prospeção que tem como objetivo, encontrar uma secção num trecho do rio, que pode ter um comprimento de alguns quilómetros, na qual se pode construir a obra de retenção que se pretende. Nesta secção é feita caracterização geotécnica baseada em prospeções e ensaios que possibilitam o estudo de diferentes soluções. Com o objetivo de construir a melhor solução, que cumpra os objetivos propostos, equaciona-se do ponto de vista técnico, económico e ambiental, a viabilidade dos diferentes tipos de barragens de betão ou de aterro.

Para a execução de barragens de betão, no caso das barragens de abóbada simples ou múltiplas com a curvatura simples ou dupla, a sua implantação requer um vale encaixado e de preferência simétrico. Simultaneamente o maciço de fundação tem que ser extremamente competente para suportar as elevadas ações que lhe são impostas. Os requisitos materiais, durante a construção, são a proximidade de manchas de empréstimo, que estejam situadas preferencialmente submersas, com a qualidade adequada para a produção do betão. Já no caso das barragens de gravidade e as suas variantes, aligeiradas ou contrafortes, para ser possível a sua construção, a fundação tem de ter muito boas características para suportar o seu peso, ainda que as ações não sejam da magnitude das transmitidas por barragens de arco. Quanto aos requisitos materiais na sua construção, tal como no primeiro exemplo, são necessárias manchas de empréstimo com uma qualidade adequada para o fabrico de betão que estejam situadas, de preferência, na albufeira, mas neste caso, é preciso um volume bastante superior de betão para permitir a sua construção.

No caso das barragens de aterro, estas podem ser construídas com maciços em enrocamento ou em terra, juntamente com um órgão impermeável como um núcleo ou um paramento

impermeável. Existem várias combinações possíveis da solução final ao serem utilizadas diferentes camadas de material com diferentes permeabilidades.

De uma forma geral, este tipo de soluções permite a construção em maciços de fundação de qualidade menor, onde as barragens de betão não são possíveis. Esta diferença de exigência resulta do facto de que, ao contrário as construções em betão, os aterros são mais dúcteis e por isso têm uma maior capacidade de adaptação às deformações do maciço de fundação.

Os requisitos materiais, no caso das barragens de enrocamento, são os materiais grosseiros que constituem o seu corpo e ainda materiais que permitam a construção de um órgão de estanqueidade. Este pode ser um núcleo impermeável ou então uma cortina que pode ser de betão de cimento ou de betão betuminoso. Para as barragens em terra, existe uma exigência grande em relação aos locais de empréstimo pois necessitam de cumprir a viabilidade económica e a disponibilidade, tanto em quantidade como em qualidade, de material que cumpra os requisitos da construção das camadas drenantes, dos filtros que protegem as camadas do arrastamento, dos maciços estabilizadores, dos enrocamentos de proteção exterior e do órgão de estanqueidade. Como regra geral, neste tipo de barragens é um núcleo impermeável, ainda que seja possível a utilização de uma cortina.

O tratamento das fundações é então concebido em função do tipo e da dimensão da barragem bem como das características do maciço de fundação. Este é constituído por uma campanha de prospeção geológica, uma fase de consolidação do maciço rochoso e por fim a execução da cortina de impermeabilização seguida de drenos e piezómetros.

Esta prospeção, que se faz no âmbito dos tratamentos de fundação, tem como objetivo a completa caracterização das propriedades do maciço e das suas descontinuidades. Esta consegue-se através da observação da rocha e pela abertura de furos, com recolha de amostra, onde se realizam depois ensaios de absorção e ensaios sísmicos.

Depois de se adquirir um conhecimento adequado das propriedades do maciço de fundação, inicia-se o processo da sua consolidação. Esta fase do tratamento tem como objetivo principal a melhoria da capacidade mecânica e da rigidez da fundação e, por isso, geralmente a consolidação está associada às barragens de betão, por serem estruturas mais suscetíveis aos assentamentos. Isto é conseguido pela substituição do material de fraca qualidade por cimento através de injeções de calda sob pressão. Os trabalhos de consolidação separam-se na consolidação localizada, que é um tratamento aplicado em zonas particulares de um maciço como as falhas, na consolidação generalizada, que é realizada ao longo de toda a fundação mesmo onde já foi feito o tratamento localizado, e ainda os trabalhos de ligação betão rocha que têm o objetivo de tornar a transição entre o betão e a rocha impermeável e com capacidade de resistir às ações a que vai estar sujeita.

Depois de a consolidação estar concluída pode-se avançar para a execução da cortina de impermeabilização. Esta materializa-se através de injeções, a acompanhar o desenvolvimento da barragem segundo uma ou mais fiadas de furação, que preenchem os vazios do maciço por

cimento e constituem um órgão vital em qualquer barragem, ao criarem um órgão de retenção que se desenvolve em profundidade.

Dependendo do seu tipo a execução da cortina varia e tem diferentes aspetos a considerar. Em barragens de aterro a cortina necessariamente tem de ser construída como continuação do órgão impermeabilização, ou seja, é construída sob o núcleo ou sob o paramento impermeável. No caso das barragens com núcleo isto tem a consequência de ter que ser executada antes da construção da barragem em si devido à sua sobreposição, já nas que têm paramento impermeável de montante, a cortina de impermeabilização tem uma maior flexibilidade de construção por se situar num extremo da construção. As barragens de betão são concebidas para uma execução dos tratamentos mais facilitada, ao serem construídas galerias que permitem o acesso à fundação. Estas também permitem que qualquer tratamento de fundação possa ser feito durante ou depois da construção da barragem, criando uma maior flexibilidade na programação dos trabalhos, minimizando as interferências com outros tipos de trabalhos. Nestes casos de corpos de retenção, a cortina geralmente é construída na proximidade do pé de montante.

O projeto final do tratamento por injeções é algo que nunca pode ser considerado como fechado à partida, sendo objeto de melhorias concomitantemente com os resultados e informações que vão sendo colhidos à medida da execução dos trabalhos. Então é gradualmente desenvolvido pela informação combinada das amostras recolhidas da furação, dos ensaios de Lugeon e dos ensaios sísmicos que são realizados depois dos furos estarem abertos bem como os próprios valores da absorção de calda de cimento a evolução da drenagem e da piezometria.

1.2. ENQUADRAMENTO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação, inserida no Mestrado Integrado em Engenharia Civil em Geotecnia, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, tem como objetivo a análise das principais condicionantes subjacentes à definição do tratamento de fundação, e resultado destas, relativas à barragem do escalão principal do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor.

Por isso os assuntos discutidos neste documento vão incidir principalmente nos tratamentos de fundações de barragens de betão. Ainda que alguns assuntos aqui abordados, com as devidas adaptações, possam ser aplicados em barragens de aterro.

2

TRATAMENTO DE FUNDAÇÕES

2.1. INTRODUÇÃO

Em praticamente todos os maciços rochosos verifica-se a existência de singularidades geológicas com uma influência importante na sua capacidade mecânica, deformabilidade e permeabilidade, no entanto estes apresentam uma grande variabilidade de local para local, mesmo dentro do próprio maciço, devido à história geológica de cada maciço.

O maciço de fundação de uma barragem, em especial para barragens de grande porte, está sujeito a incrementos do estado de tensão com valores notáveis, é por isso fundamental um bom tratamento de fundações para que seja possível um eficaz funcionamento do aproveitamento hidráulico.

2.2. ELEMENTOS DO TRATAMENTO

A consolidação generalizada consiste em injeções com a função de capacitar a fundação de uma maior rigidez que limita os movimentos e reduz o risco de fissuração. Geralmente esta é aplicada em furação feita em leques, espaçados em intervalos regulares, sob a estrutura e são feitos a partir das galerias ou dos encontros com a rocha.

2.2.1. CONSOLIDAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO

O objetivo que se pretende atingir com este tipo de tratamento é, essencialmente, o de melhorar as características de deformabilidade e de resistência ao corte do maciço rochoso subjacente à estrutura da barragem, através do preenchimento com caldas de cimento da generalidade das descontinuidades que apresentem alguma abertura, ou daquelas cujo enchimento seja constituído por materiais deformáveis e erodíveis pela percolação da água através da fundação e que se considera poderem ser facilmente removidos através de processos executivos que correntemente são utilizados no tratamento de fundações.

De uma forma geral, considera-se que este tipo tratamento deverá ser limitado às zonas do maciço rochoso onde se registarem os maiores incrementos do estado de tensão gerados pela construção e funcionamento das estruturas, as quais correspondem geralmente às zonas mais afetadas pela descompressão devida às escavações para a inserção da barragem. Evidentemente que, nessas

zonas, ao proceder-se ao preenchimento das descontinuidades por cimento, conseguir-se-á um maciço com comportamento estrutural menos heterogéneo, menos deformável e menos permeável.

Genericamente, a consolidação consiste na injeção de caldas de cimento que deverão interessar as zonas do terreno situadas sob a barragem. Tais injeções serão realizadas através de furos, normalmente abertos a partir das galerias da barragem ou da fundação, constituindo leques de tratamento onde também foi realizada uma lavagem e uma limpeza, com o objetivo de soltar e remover o material de fraca qualidade dos enchimentos das descontinuidades e os resíduos criados pela furação. Estes processos de lavagem e limpeza devem ser feitos imediatamente antes das injeções de calda, e são feitos através da alternância de jatos de água e jatos de ar durante uma certa duração.

Com esta disposição em leque, será garantida, nas zonas próximas dos contactos entre o betão e a rocha, uma maior densidade de furação e, em consequência, uma maior proximidade dos pontos de irradiação da injeção para as descontinuidades aí presentes. Note-se que geralmente, é junto à ligação betão-rocha que o maciço se pode encontrar particularmente mais afetado pela descompressão devida às escavações, pela fraturação existente e resultante dos processos de escavação com o uso de explosivos e pela exposição mais prolongada da sua superfície à ação dos agentes de meteorização.

Deve ser definido um volume do maciço rochoso a consolidar por injeções, o critério delimita a zona a tratar e constitui a envolvente dos estados de tensão incrementais superiores a determinado valor, sendo esta envolvente definida a partir dos resultados das análises estruturais obtidos para as diferentes combinações de ações na fundação. Em Portugal, a EDP frequentemente utiliza como critério geral, para a base da criação da envolvente, um valor de incremento da tensão principal máxima de 1MPa.

Tabela 1 – Envoltantes de tratamentos por consolidação por injeções baseadas no incremento das tensões principais máximas (Elementos de projeto da Barragem do Alqueva, 1999)

	Fronhas	Cabril	Alto Lindoso	Caldeirão	Alqueva
Altura máxima (m)	62	136	110	39	93
Fundação	Xisto	Granito	Granito	Xisto/Granito	Xisto
Envoltante (MPa)	1,0	1,0	0,8	0,3	1,0

Este tratamento deve ser feito idealmente depois da construção de parte do corpo da barragem estar concluído, pois as injeções são executadas à custa de pressões elevadas, aplicadas na calda de cimento, que depois as transmitem às paredes das descontinuidades criando um risco de levantamento do maciço. Caso seja necessário fazer as injeções antes do corpo da barragem ter começado a construção, como é o caso das barragens de aterro, recorre-se à construção de uma

laje de proteção que se opõe, por ação da gravidade ou por pregagens, às ações de levantamento originadas pelas injeções.

Outro aspeto a ter em atenção na consolidação, é o tratamento de falhas. Estas encontram-se frequentemente nos maciços de fundação, e podem apresentar características muito prejudiciais para a segurança de uma barragem pela sua orientação e dimensões. Então, é necessária uma intervenção para melhorar as propriedades neste acidente geológico, denominada por consolidação localizada. A execução deste tratamento poderá começar pela remoção do material de preenchimento, através dos processos de lavagem e de limpeza, procedendo-se depois à realização das recravas de betão para então, por fim, se fazer furação seguida das injeções. Neste caso, em oposição com a consolidação generalizada, é feita com argamassa, caldas grossas de cimento ou então, caso seja necessário, com betão. Outra técnica possível para o seu tratamento é o jet grouting, este desagrega o material misturando-o com calda de cimento através de jatos pressurizados, resultando no final colunas de solo-cimento. Um exemplo de execução deste tratamento é o da barragem do Alqueva, onde estava presente no maciço uma falha com muito fracas características geotécnicas, e foi determinado que parte desta fosse substituída por betão injetado recorrendo a esta técnica, dando origem ao reforço estrutural requerido.

2.2.2. CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO

É atribuída a estas cortinas a função de minimização dos efeitos perniciosos da circulação de água no maciço. Isso é conseguido ao criarem um obstáculo à circulação de água, que é executado no maciço do lado de onde se registam as maiores cargas hidráulicas, e onde podem diminuir mais eficazmente os gradientes hidráulicos. Como consequência também diminuem as subpressões na base das estruturas, melhorando as respetivas condições de estabilidade mecânica. Diminuem também as velocidades e caudais de percolação, contribuindo para a estabilidade hidráulica dos maciços de fundação.

Apesar do tratamento de consolidação contribuir para este objetivo, geralmente não tem profundidade suficiente para ter uma contribuição significativa, e além disso não há um controlo de qualidade com o necessário cuidado em relação às questões de permeabilidade.

Embora se admitam múltiplos alinhamentos de furação para a execução da cortina de impermeabilização, a solução mais comum é a realização de uma só, na qual é escolhido um espaçamento entre furos relativamente pequeno para que seja criada uma cortina contínua.

2.3. FATORES CONDICIONANTES NO TRATAMENTO

A caracterização da geologia do maciço rochoso é imprescindível antes de qualquer tratamento. Segundo Houlsby (1990), é necessário ter conhecimento suficiente do maciço a ser usado como fundação de modo a que seja possível determinar as características da calda a injetar bem como a quantidade espectral a ser necessária. Por este motivo, Manuel Rocha (1981) afirmou que a

mecânica das rochas pede à geologia os limites de camadas e suas fraturas, a natureza da rocha de cada camada, os enchimentos das fraturas e as suas orientações.

Depois da escolha do local da barragem é feito um estudo geológico geotécnico profundo, para que seja tomado o conhecimento das propriedades do maciço. Este engloba estudos de percolação, tendo em conta a variação da permeabilidade com o estado de tensão, estudos da erosão devido à passagem de água e estudos de estabilidade da fundação. Esse estudo de caracterização deve ser feito sempre que possível recorrendo a furação com recuperação de amostra, pois desta forma é possível cruzar toda a informação recolhida com a observação dos materiais encontrados nas amostras e criar um zonamento mais completo do maciço de fundação. Para além disso esta informação é muito útil, posteriormente à injeção, para uma melhor compreensão dos fenómenos que condicionam a execução dos trabalhos. Sobre esse assunto Manuel Rocha (1981) diz “além do conhecimento da geologia do local da obra em estudo, interessa também dispor de um bom conhecimento da geologia da região o qual constitui enquadramento que facilita e orienta o estudo local a carência de tal enquadramento é por vezes a causa da deficiência de estudos geológicos realizados para uma dada obra”. Antes da realização do estudo geológico deve haver um tomar de conhecimento por parte dos seus executantes, com o objetivo de enquadrar, focar e prever a equipa dos diferentes aspetos com que se vão deparar.

Essa informação é base para a conclusão dos trabalhos do tratamento da fundação, nomeadamente as recravas, a consolidação e a impermeabilização, sendo utilizada na definição das orientações dos furos de injeção, o tipo de calda e a pressão a utilizar e ainda as técnicas de furação e injeção.

2.3.1. MATERIAL ROCHOSO

Designa-se por material rochoso, ou simplesmente por rocha, o material situado entre as superfícies de compartimentação de um maciço, isto é, o material dos blocos, completamente separados ou não, que essas superfícies determinam.

O maciço rochoso não é contínuo, e apresenta fraturas macroscópicas, microscópicas e poros. A necessidade da consideração das propriedades da rocha no comportamento de um maciço de fundação é muito variável. Nos casos em que esta se apresenta pouco ou nada alterado é suficiente que apenas sejam consideradas as propriedades das superfícies de compartimentação, uma vez que a deformabilidade, a resistência e outras propriedades da rocha asseguram a satisfação das exigências postas pela obra. Há, porém, casos nos quais o material rochoso desempenha papel primordial, em que este apresenta muito baixa resistência, em particular rochas alteradas, ou então quando o maciço está submetido a estados de tensão muito elevados, onde também devem ser realizados estudos do material rochoso.

De qualquer modo, deve sempre ser feita uma caracterização geral do maciço, focada nos parâmetros da deformabilidade e da permeabilidade. Regra geral a sua determinação exige a realização de ensaios “*in situ*”, ensaios sísmicos para avaliar a deformabilidade e ensaios de absorção de água para avaliar a permeabilidade.

A atribuição de valores do módulo de deformabilidade a um maciço rochoso é um problema complexo que exige alguma experiência, dependendo da natureza do problema em causa e portanto da precisão com que interessa determiná-la, devido à grande variabilidade e à quantidade de parâmetros com influência neste aspeto.

2.3.2. DIÁCLASES

Segundo Manuel Rocha (1981) é universal definir diáclase como qualquer rotura de um maciço rochoso na qual não se verifica deslocamento apreciável de um bordo em relação ao outro.

Designa-se por família de diáclases, um conjunto destas que apresentem aproximadamente a mesma orientação. Regra geral um maciço é cortado por diversas famílias. É muito comum a ocorrência de três famílias de diáclases as quais dividem os maciços em blocos, completamente separados ou mantendo continuidade nalgumas zonas.

Um dos aspetos fundamentais da qualidade de um maciço rochoso passa pela caracterização das diáclases. Estas podem ser desde perfeitamente fechadas a bastante abertas com preenchimentos diversos e, podem ser ar, água, minerais diversos, como quartzo, calcite e dolomite ou materiais granulares, mais ou menos argilosos. A proveniência destes materiais pode ter origem a partir da alteração da própria rocha ou então transportados da superfície ou de maciços subjacentes. A grandeza da abertura e a natureza do enchimento influencia muito a deformabilidade e a resistência ao corte dos maciços, assim como as condições de circulação da água.

Regra geral, em profundidade, a meteorização diminui e o estado de tensão aumenta. Pode-se concluir então que em profundidade a consistência dos enchimentos melhora, o espaçamento das diáclases aumenta e a abertura das diáclases diminui.

A atitude das descontinuidades é de uma importância vital e tem influência direta no comportamento de uma fundação bem como no procedimento com que estas devem ser tratadas. Outro aspecto com implicações tanto na qualidade do maciço como na facilidade de executar injeções é a rugosidade das paredes das diáclases, podendo ser polidas, lisas ou ásperas, e a sua abertura que pode ser muito fechada, com ordem de grandeza dos nanómetros, ou então muito aberta, na ordem dos centímetros, contendo geralmente um enchimento de qualidade inferior ao material rochoso. O espaçamento e o número de famílias das diáclases também tem uma grande importância pois quando o espaçamento é relativamente pequeno e o número de famílias é grande, o maciço vai ser muito fraturado, e por isso um comportamento mecanicamente e hidraulicamente desadequado como o que é pretendido num aproveitamento hidráulico. A orientação também é uma propriedade importante, por exemplo, descontinuidades que sejam perpendiculares ao curso de água são de uma relevância muito inferior às que lhe são paralelas, pois estas criam potenciais passagens à sua circulação.

2.3.3. FALHAS

As falhas são então resultantes de uma rotura por corte que separa um maciço em dois blocos através de uma superfície ou plano de falha. Estas estão presentes com frequência nos maciços de fundação e podem ter uma influência importante no seu comportamento.

Tal como acontece com as diáclases, é fundamental a determinação da atitude das falhas. Quanto ao enchimento pode tomar valores com grande variação de caso para caso, desde a ordem dos centímetros até alguns metros, regra geral é constituído por material rochoso triturado pelos movimentos da rutura que por vezes chega a ser completamente argilificado.

2.3.4. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Do ponto de vista hidráulico, o escoamento num maciço rochoso difere em geral bastante do que é observado num meio poroso. Tal deve-se essencialmente à forma e dimensões dos vazios por onde circula a água, poros num caso, descontinuidades (fissuras) no outro. O grau de abertura destas descontinuidades e a carga geram escoamentos por vezes com velocidades elevadas. O escoamento pode tornar-se turbulento, o que invalida a aplicação da lei de Darcy. Por outro lado as hipóteses correntes no caso de meios porosos, da homogeneidade e da isotropia da permeabilidade não são admissíveis em maciços rochosos.

Na prática, estas condições particulares dos maciços rochosos deveriam obrigar a que os ensaios fossem realizados de uma forma a caracterizar a permeabilidade nas várias direções do espaço (ensaios tridimensionais). Infelizmente não é fácil a execução deste tipo de ensaios, pelo que se aceita não mais do que estimar os valores médios e aproximados da permeabilidade através de métodos empíricos baseados em ensaios tais como o ensaio Lugeon. A validade dos resultados obtidos deve ser considerada relativa e depende grandemente da seriedade e dos cuidados colocados durante a execução dos trabalhos.

2.4. TIPOS DE CALDA

Para que o tratamento de um maciço tenha a qualidade pretendida bem como a durabilidade adequada, é importante a utilização de caldas adequadas ao maciço a tratar, para que sejam criadas as características de rigidez e de permeabilidade necessárias. Para o tratamento de um maciço rochoso, geralmente a calda mais apropriada, utiliza como base um dos diversos tipos de cimento Portland.

As leis dos fluidos que regem o comportamento das caldas são as leis dos fluidos Binghamianos. Em oposição com os fluidos Newtonianos do tipo da água, onde o movimento acontece sem resistência interna devido ao seu comportamento ser apenas condicionado pela viscosidade dinâmica. No caso dos fluidos Binghamianos, por se tratarem de corpos mais densos, estes já têm viscosidade dinâmico-plástica e têm o comportamento ditado pela coesão e tixotropia.

Ainda que as caldas de cimento utilizadas nas injeções sejam constituídas simplesmente pela combinação de cimento e água, é frequente a inclusão de aditivos na mistura. Estes aditivos produzem alterações no comportamento da calda e são utilizados para permitir uma mais fácil execução e maior qualidade final do tratamento. Dentro dos diversos aditivos existentes destacam-se os superplastificantes, que reduzem a viscosidade e por isso permitem penetrações superiores da calda sem ser necessário aumentar a pressão de injeção, a bentonite que estabiliza a mistura tornando-a mais previsível e mais fácil de aplicar e ainda aumenta a resistência à pressofiltração e por fim temos os materiais finos, como as cinzas volantes ou a micro sílica que para além de, à semelhança da bentonite, tornarem a mistura mais resistente à pressofiltração aumentam a durabilidade da calda após a cura.

Para realizar a distinção dos diferentes tipos de calda em função da sua fenomenologia, diferentes características da mistura devem ser avaliadas.

- Viscosidade – é a resistência interna de um fluido à tendência de circular, é controlada pela relação A/C da calda, pelas características do cimento e dos aditivos presentes na mistura; outro aspeto com influência na viscosidade são as características de hidratação do cimento bem como o tempo, a energia e a temperatura durante o processo de mistura.
- Coesão e Tixotropia – o termo coesão foi introduzido por Lombardi (1985) e é utilizado como indicador da tixotropia. A tixotropia é a propriedade de um material que causa endurecimento num curto espaço de tempo quando em repouso, adquirindo uma resistência a fluir que pode ser reduzida quando é agitado mecanicamente. Esta é uma característica dominante no comportamento da calda de cimento e que pode criar grandes complicações no caso de um processo de injeção ter que ser interrompido, por um qualquer motivo de força maior, para mais tarde ser retomado.
- Decantação – ocorre por ação da gravidade, que faz com que as partículas sólidas da calda assentem, isto tem um efeito prejudicial no tratamento pois afeta a homogeneidade final e pode criar fragilidades locais com tendência de sofrer lavagem, um bom tratamento terá necessariamente que passar por um nível de bastante baixo de decantação, idealmente inferior que 2% (Weaver e Bruce, 2007 em Gama, 2012).

2.5. INTERESSE DAS GALERIAS DE VISITA NOS TRATAMENTOS DE FUNDAÇÃO

As galerias permitem o acesso ao interior dos maciços e a sua observação direta. Utilizam-se correntemente no estudo de diversos tipos de obras, entre estas, as fundações de barragens. Oferecem a vantagem de não terem de ser construídas necessariamente segundo uma reta, ou seja podem mudar de direção e de inclinação possibilitando uma maior variedade de soluções.

A inclusão de galerias de visita na execução de grandes barragens também traz vantagens tanto para o tratamento das fundações como para a operação futura da obra de retenção. As possíveis vantagens são:

- O tratamento não é condicionado pela adversidade do tempo;

- O tratamento pode ser feito sem ser necessário recorrer a desvios do rio nem a esvaziamentos da albufeira;
- A sequência de construção da barragem é melhorada por tornar o processo de tratamento independente e evita atrasos;
- Possibilita a utilização de pressões mais elevadas, promovendo uma maior eficácia do tratamento, permitindo ainda uma maior flexibilidade à malha de furações;
- Permite que seja feita furação e injeção de furos em profundidades diferentes, mitigando o risco de desvios e baixando o custo dos tratamentos mais profundos;
- A execução da cortina de impermeabilização é facilitada permitindo tanto uma maior acessibilidade à área a tratar como também uma maior possibilidade de sobreposição de injeções;
- Permite o acesso permanente ao maciço para diversos fins como a observação, realização de ensaios, a execução de drenos ou até a realização de novas injeções durante a duração de utilização da barragem.

3

DEFINIÇÃO DA CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO

3.1. DIMENSIONAMENTO

As medidas de redução da permeabilidade hidráulica do maciço, em especial as cortinas de impermeabilização, têm vindo a ganhar importância com o tempo. Isto prende-se com crescente preocupação na produção de energia limpa e sustentável. Como consequência água é cada vez mais valiosa assim como as questões relacionadas com a sua reserva.

Portanto, é cada vez mais relevante que no dimensionamento da cortina de impermeabilização se utilizem as soluções mais eficazes adaptadas em função das características do maciço para que seja alcançado o melhor resultado possível.

3.1.1. PROFUNDIDADE DA CORTINA

Segundo a prática europeia a profundidade da cortina de impermeabilização deve ter a mesma dimensão que a altura da barragem, mas pode atingir valores superiores até um máximo de 1,5 vezes a altura caso seja necessário (Ewert, 2003 em Gama, 2012).

Este autor refere que, a prática americana é menos exigente e tem como fórmula para calcular a profundidade o de aumentar o caminho de percolação da água para algum valor consistente com o comprimento da fundação da barragem. Esta metodologia tem como objetivo a proteção da barragem dos efeitos da percolação e ignora as questões de perda de água, por esse motivo conduz a soluções em que o caudal de água perdido tenha um valor substancial.

Segundo Ewert (2003), devem ser as considerações geológicas e não as condições geométricas o fator preponderante na definição da profundidade que a cortina irá ter, mesmo que leve à construção de uma cortina assimétrica.

O desvio dos furos é um parâmetro que limita a profundidade máxima para evitar zonas sem tratamento entre furos da cortina. O desvio depende das condições geológicas, do equipamento de furação utilizado e do cuidado com que os furos foram feitos. Ewert (op. cit.) sugeriu uma

profundidade máxima de 50 m para maciços de fraca qualidade, refere também a possibilidade de aumentar este limite até aos 150 m, quando na presença de um maciço com condições muito desfavoráveis à retenção de água.

3.1.2. EXTENSÃO DA CORTINA

A cortina de impermeabilização deve ter uma extensão que seja suficiente para que a água não a contorne. Para tal Ewert (2003) sugere que esta seja estendida até à interceção entre a água do reservatório e nível freático natural. Refere ainda que os maciços permeáveis criam uma subida do nível freático, criando percolação para o interior dos encontros, necessitando de uma ampliação da cortina para limitar convenientemente as passagens de água.

Esta ampliação pode ser dificultada se os encontros forem muito íngremes, recorrendo-se então a injeções em leque. Esta técnica está mais sujeita a desvios do que o normal, por causa da variação da inclinação de cada furo e, por isso, é espectável um resultado final inferior.

3.1.3. ESPAÇAMENTO E ORIENTAÇÃO DOS FUROS

Em projeto, é escolhido um espaçamento para a furação inicial (furação primária), depois caso seja necessário, são feitas furações subsequentes sempre numa posição intermédia dos furos já existentes (furações, secundárias, terciárias, etc.).

É então importante que o valor do espaçamento inicial não seja sobrestimado, tornando o espaçamento demasiado grande, pois corre-se o perigoso risco de ficarem por tratar secções do maciço. Estas podem prejudicar, e possivelmente comprometer, o comportamento final da cortina que só pode ser corrigido à custa de trabalhos adicionais. A escolha de um valor demasiado alto deve então ser evitada, pois conduz a erros na estimativa dos custos bem como a zonas de tratamento mais pobre.

O projetista então deve acomodar no projeto uma quantidade extra de furação para salvaguardar estas situações. Um valor na ordem dos 50% provavelmente não será excessivo na maioria dos casos, pois uma redução desta ordem no espaçamento inicial resulta na duplicação da quantidade de furos primários a realizar (Weaver e Bruce, 2007 em Gama, 2012).

Em relação à orientação, como se pode observar na Figura 1, idealmente é executada perpendicular à superfície do maciço. Pois com esta orientação o trabalho é muito mais eficiente devido ao menor comprimento de furação a realizar e à maior facilidade na execução.

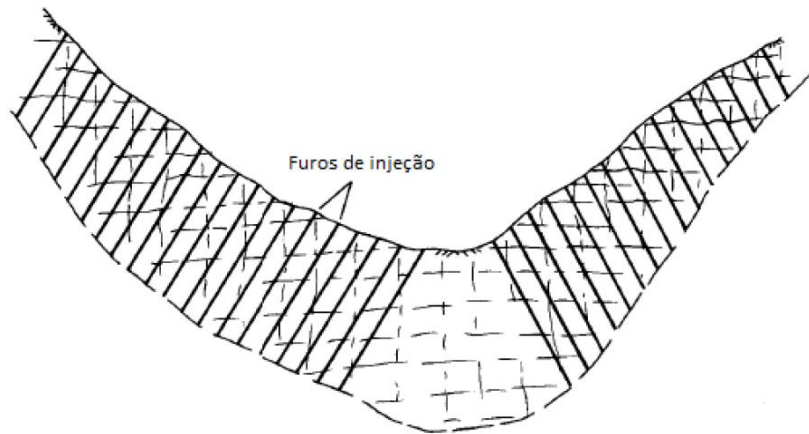


Figura 1 – Definição da orientação dos furos de uma cortina de impermeabilização (adaptado de Houlsby, 1990)

No entanto as orientações das discontinuidades podem desaconselhar esta orientação. Isto prende-se com o princípio de que cada furo de injeção deve intersecar o máximo de discontinuidades possível. Para além disso se a furação for paralela a uma das famílias de diáclases, estas muito dificilmente ficaram tratadas convenientemente. Na Figura 2 que se segue fica exemplificado, para um maciço de condições semelhantes, uma má escolha da orientação e o oposto respetivamente.

Outro aspeto a ter em conta na escolha das orientações é a existência de uma família de discontinuidades com uma característica particularmente prejudicial, como por exemplo por criar um maior potencial para a passagem de água. Nestes casos, a orientação deve ser escolhida para que seja potenciado o tratamento dessa família. Como exemplo, a Figura 2 demonstra um caso de furação, no qual as diáclases verticais são mais abertas e por isso mais importantes do que as horizontais, então a orientação dos furos é escolhida de maneira a que a ligação com as aberturas verticais seja favorecida.

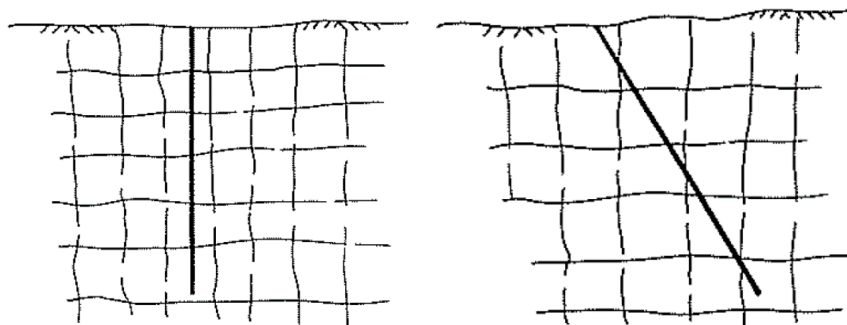


Figura 2 – Exemplificação de uma orientação errada (à esquerda) e uma correta (à direita) da furação em relação a uma família de discontinuidades (adaptado de Houlsby, 1990)

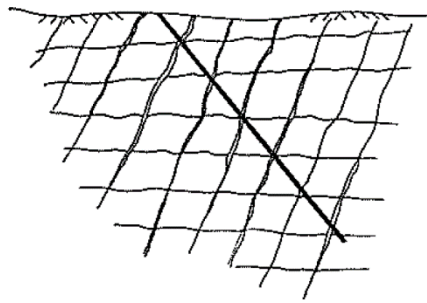


Figura 3 – Relação entre a inclinação dos furos e a abertura das fendas (adaptado de Houlsby, 1990)

O Comité Suíço de Grandes Barragens (1985, in Weaver e Bruce, 2007) indicou que os furos deveriam interseccionar os principais planos de descontinuidades com ângulos superiores a 30° de modo a que se interseccionasse o maior número de fraturas possível.

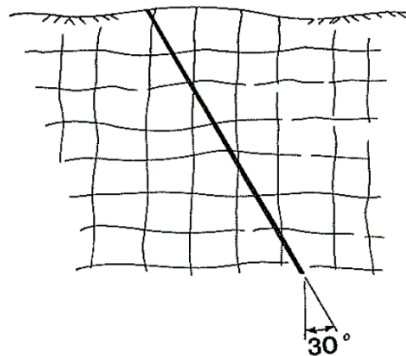


Figura 4 – Inclinação mais eficaz dos furos de injeção na presença de famílias de descontinuidades subverticais e subperpendiculares entre si (adaptado de Houlsby, 1990)

3.1.4. PRESSÕES DE INJEÇÃO

A escolha dos valores de pressão adequados para a injeção num maciço rochoso está diretamente relacionada com a presença de descontinuidades relativamente fechadas.

Em 1959, o US Corps of Engineers, conduziu ensaios de penetração injetando calda entre dois blocos de betão combinando variações na pressão utilizada e na abertura entre os blocos. Da análise dos ensaios chegou-se à conclusão de que a pressão tem uma influência considerável na penetração de fendas mais fechadas, enquanto para aberturas maiores não se observou alteração no comportamento.

Segundo Weaver (2000), as práticas comuns utilizadas pelos especialistas europeus e americanos têm gerado acesa discussão de parte a parte. Na Figura 5 está representada a relação da pressão com a profundidade que cada lado toma.

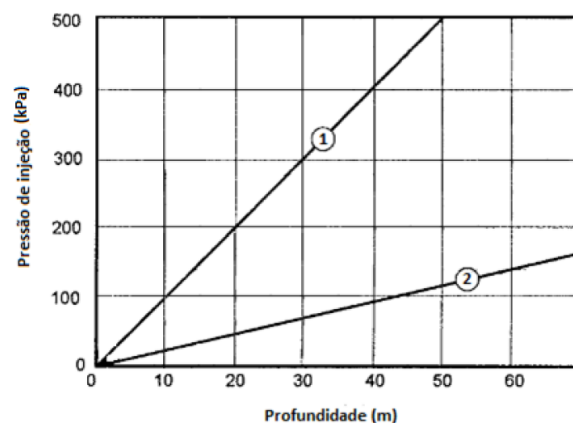


Figura 5 – Representação gráfica de (1) “prática europeia” e (2) “prática americana” (adaptado de Gama, 2012)

Do ponto de vista dos especialistas americanos a prática europeia utiliza pressões demasiado altas em profundidades pequenas, que são prejudiciais para maciços com risco de fracturação. Apesar disso esta prática tem sido aplicada, em rochas de qualidade razoável, com resultados positivos.

Na prática americana é clara a preocupação em manter a pressão em níveis moderados para não causar fenómenos de levantamento devido às injeções, mas como consequência, as injeções não têm penetração suficiente, mantendo ainda assim pressões suficientemente altas para danificar rochas com fraca capacidade mecânica.

Tanto a prática europeia como a americana não devem ser vistas como regra e aplicadas cegamente, mas sim utilizadas como guia num processo de escolha ponderado para cada caso em função de diversos fatores existentes no local.

3.2. PREVISÃO DO CONSUMO DE CALDA

A motivação principal para uma previsão do consumo de calda no tratamento das fundações próxima da realidade é a necessidade que a orçamentação da empreitada seja o mais rigorosa possível. Esta previsão não é mais do que o volume de calda ou peso seco de cimento que irá ser absorvido pela fundação durante as injeções.

Este é um problema complexo de ultrapassar com precisão porque a penetração da calda depende da abertura das fraturas, da rugosidade, da persistência e interação com outras fraturas bem como da viscosidade da calda, da pressão com que é injetada e da duração da injeção.

Existe uma tendência natural de associar o ensaio de Lugeon à estimativa do consumo de calda, isto é resultado da proximidade aparente entre os conceitos gerais do ensaio e das injeções de calda. No entanto o ensaio de Lugeon, quanto a questões de consumo de calda, não deve ser mais do que um guião que apenas revela a tendência de comportamento de um maciço quando injetado.

Bozovic (1985), no seu relatório geral do Congresso ICOLD, concluiu que a correlação entre consumo de calda e o valor de Lugeon de um maciço é muito fraca. Bozovic (1985) sugere que tendo em consideração diferentes propriedades reológicas da calda e da água, a correlação é fisicamente impossível.

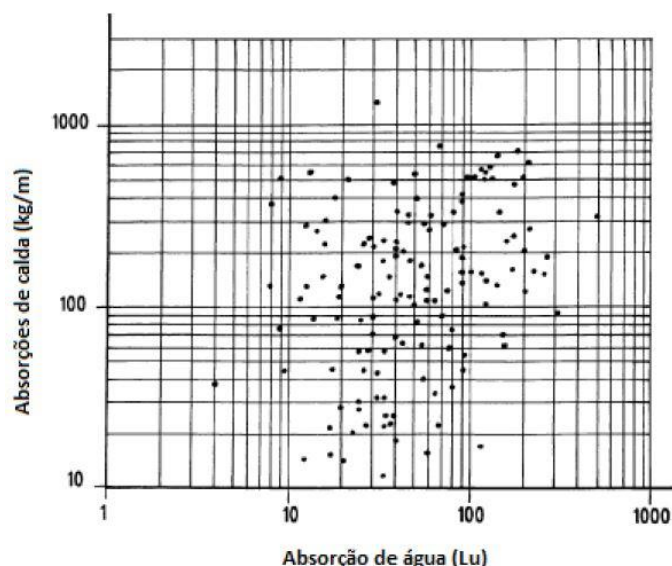


Figura 6 – Correlação entre absorção de água e calda (adaptado de Jawantzky in Ewert, 1985)

Autores como Ewert (1985) e Sims e Rainey (1985) concordam, que numa comparação direta entre o consumo de calda e os valores de Lugeon, há uma correlação muito fraca. No entanto, estes são da opinião que, à semelhança da abertura das discontinuidades, que é estimada pelo seu espaçamento, e da penetração da calda, que é estimada a partir do tamanho das partículas, pressão da calda, da viscosidade e do tempo, deveria ser possível obter uma melhor previsão da absorção de calda da mesma forma.

Conclui-se que a melhor abordagem é a de recolher informação de barragens com características geológicas semelhantes e fazer estimativas iniciais de absorção por metro de furo baseado nessa informação. Para um nível razoável de precisão, é necessária a execução do mesmo processo numa área representativa da fundação da barragem, com monitorização cuidadosa de todas as fases e dos equipamentos para que os resultados não sejam enganadores.

3.3. CRITÉRIO DE FECHO DE INJEÇÃO

Para a execução das injeções para a cortina de impermeabilização deve haver um processo estabelecido de trabalho, para tal utilizam-se diversos critérios para definir a sua interrupção.

3.3.1. CONCEITO DE NEGA

A “nega” dá-se quando se atinge um caudal reduzido num período de tempo. No entanto a definição do caudal e das condições com que este se atinge ainda não são consensuais.

Peritos no tratamento de fundação por injeções de calda chegaram a um valor de nega, resultado da sua experiência de execução, que esta se dá quando o volume de calda absorvido é inferior a 28 litros durante um intervalo de tempo de 5 a 15 minutos (intervalo definido pela intensidade pretendida), no entanto outros dizem que só se deve interromper depois de alguns minutos sem absorção com pressão constante (Warner, 2004 em Gama, 2012).

Segundo Houlsby (1990), a pressão deve ser mantida durante 15 minutos depois da nega ter sido atingida, independentemente do critério escolhido. Desta forma a calda é estabilizada tempo suficiente para haver um enrijecimento tixotrópico e garantir um mínimo de capacidade resistente à lavagem causada pela circulação de água.

Weaver (1991) refere que o California Department of Water Resources usa um critério próximo do escrito por Houlsby (1990), e cita Bussey (1973): “É muito importante continuar o bombeamento da calda enquanto se regista alguma absorção em qualquer intervalo de 10 min.”

Há que referir que estes critérios foram pensados para a utilização de caldas instáveis, ou seja caldas com reologia variável e muito suscetíveis a fenómenos de filtração, segregação e sedimentação, e que por isso estão sujeitos a fenómenos de exsudação consideráveis. Houlsby (1990) refere que com a utilização deste tipo de calda é necessário fazer uma purga, pois a secção superior do trecho fica bastante empobrecida pelo assentamento das partículas, seguindo-se de uma nova injeção de calda contrariando, de certo modo, os efeitos negativos da instabilidade.

Warner (2004, em Gama, 2012) considera as caldas instáveis antiquadas e o seu uso futuro inadequado, sugerindo que, para caldas estáveis, a nega deve ser qualquer ponto das injeções onde não existam valores de absorção de calda mensuráveis durante um curto espaço de tempo (1 a 5 min).

3.3.2. CRITÉRIO DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Neste critério utiliza-se uma permeabilidade máxima estabelecida em projeto como objetivo a atingir pela execução da cortina de impermeabilização. O seu valor é definido em função da importância da operação. É comum definir-se o valor máximo da permeabilidade como 1 Lugeon mas em obras de menor importância, com tensões menores, a utilização de valores superiores é aceitável. Segundo Nonveiller (1968) é extremamente difícil baixar a permeabilidade de um maciço fraturado de 10^{-5} cm/s para 10^{-6} cm/s através do uso de caldas de cimento convencionais. Para atingir valores finais inferiores a 1 Lu será necessário recorrer à utilização de cimentos especiais mais finos, a aditivos que permitam maiores penetrações, a maiores pressões, a equipamentos com mais rendimento ou até a outro tipo de calda. No entanto esta magnitude de exigência é incomum e normalmente se é exigida em obras especiais.

A aplicação de critérios baseados na condutividade hidráulica depende da realização de ensaios de permeabilidade em todos os trechos de cada furo no decorrer da execução da cortina para que se possa saber quando é atingido o valor pretendido.

Houlsby (1976) diz que se deve observar uma redução significativa da permeabilidade quando se faz uma furação espaçada de 1,5 m, caso contrário deve ser feito um estudo especial para se perceber qual o motivo da ocorrência. Segundo aquele autor:

“Condições geológicas pouco usuais, ou a utilização de uma técnica pouco apropriada são causas possíveis do problema. As ações de remediação a considerar podem incluir a execução de mais furos, no entanto quando o espaçamento entre eles atingir 0,75 m ou menos, o critério de fecho deixa de ser tão importante, passando a ser necessária a procura de fraquezas individuais na fundação, envolvendo a utilização de furos com orientações muito diferentes dos anteriores.”

3.3.3. CRITÉRIO DA ABSORÇÃO DE CALDA

Os critérios para concluir a injeção de caldas baseados na absorção de calda são a prática mais econômica e, por isso, mais fáceis de aplicar do que os baseados na condutividade hidráulica. A sua economia resulta da não exigência de realização de ensaios de permeabilidade em todos os furos.

Deere (1976 in Warner, 2004) criou uma Tabela 2 de classificação simples de fácil aplicação, mais tarde Deere (1982) reviu este sistema e criou também uma Tabela 3 para furos secundários.

Tabela 2 – Sistema de classificação proposto por Deere para furos primários (1976)

Classificação	Absorção de calda (kg/m)	Símbolo
Muito Baixa	0 – 12,5	VL
Baixa	12,5 - 25	L
Moderadamente Baixa	25 - 50	ML
Moderada	50 – 100	M
Moderadamente Alta	100 – 200	MH
Alta	200 – 400	H
Muito Alta	> 400	VH

Tabela 3 – Critério de absorção de calda para furos secundários sugerido por Deere (1982)

Profundidade (m)	Absorção de calda (kg/m)	Classificação
0 – 10	25	L
10 – 20	34	ML
20 – 30	50	ML
> 30	100	M

Houlsby (1982, em Gama, 2012) propôs os seguintes valores como sendo típicos para critérios de fecho do tratamento em termos de quantidade de cimento injetado num determinado furo:

- 35 kg/m no primeiro trecho;
- 46 kg/m no segundo trecho;
- 70 kg/m em todos os trechos posteriores.

Através deste critério proposto por Houlsby, é executado um tratamento onde se atingem permeabilidades moderadamente baixas à superfície diminuindo a exigência em profundidade atingindo-se permeabilidades moderadas.

No entanto, Houlsby (op. cit.), diz que em casos de cortinas onde foi possível testar a evolução da permeabilidade utilizando este critério, a solução final ainda apresentava absorções da ordem de grandeza de 10 U.L.. Por isso, não é aconselhada a utilização exclusiva deste critério devido aos maus resultados observados.

A utilização de critérios baseados na absorção não deve ser feita cegamente, pois desse modo qualquer redução das absorções, devido a arrastamentos de finos por exemplo, é interpretada como uma melhoria do maciço. Portanto para uma correta avaliação da qualidade do tratamento através destes critérios, a análise deve ser complementada com outros parâmetros que permitam despistar duvidosas interpretações de resultados.

3.3.4. CRITÉRIO GEOLÓGICO

A concepção de uma cortina de impermeabilização deve ser realizada com base no conhecimento da geologia da fundação, sendo importantes, não só os resultados obtidos nas fases de reconhecimento como a caracterização da superfície escavada para a fundar a barragem. A partir desta informação o projetista define os espaçamentos iniciais entre furos, que depois podem ser ajustados com a informação do operador, caso este tenha uma experiência adequada, ficando em aberto a possibilidade de um refinamento do espaçamento das sondagens a realizar se houver necessidade. Então, num processo iterativo, é feita a avaliação do maciço numa malha de sondagens e ensaios que aperta em zonas de resultados mais fracos.

Qualquer barragem situada num talvegue encontra-se quase sempre sobre algum acidente geológico que em princípio deverá ser tratado, pois estes são frequentemente um caminho privilegiado à circulação de água. Então quando são encontrados valores elevados de absorção em trechos particulares, a frequência dos ensaios de caracterização dessa zona deve ser aumentada para uma avaliação mais detalhada das imperfeições presentes.

A decisão acerca do espaçamento e da profundidade dos furos, de modo ser obtido um tratamento adequado, deve então ser baseada em grande parte na análise dos ensaios de permeabilidade e de injetabilidade em conjunto com a examinação de um perfil geológico contruído através da análise de uma cartografia geológica superficial e dos dados existentes sobre a geologia em profundidade, nomeadamente da análise dos tarolos de sondagem.

3.4. ENSAIO LUGEON

O ensaio Lugeon consiste na injeção (radial) de água sob pressão num certo trecho de um furo de sondagem e não medição da quantidade de água que entra no maciço rochoso durante um certo tempo, a uma dada pressão de injeção, depois de estabelecido um regime de escoamento permanente. A realização do ensaio em vários degraus de pressão, crescentes e decrescentes (vulgarmente com sequência do tipo $P_1, P_2 = 2P_1, P_3 = 2P_2, P_2, P_1$), permite traçar curvas caudal versus pressão (Q-P) que dão informação quanto ao regime de percolação do maciço e quanto ao estado e tipo de fraturação nas vizinhanças do trecho ensaiado.

A tendência para normalização levou a que, em regra, o ensaio Lugeon seja realizado nas mesmas condições, independentemente do tipo e dimensão das obras que vão ser fundadas no maciço respetivo. Apareceu assim a unidade Lugeon que corresponde ao valor médio da absorção de 1 litro por minuto e por metro de furo, para um patamar de injeção com a duração de 10 minutos em que a pressão de injeção da água se mantém estabilizada no valor de 1 MPa. A 1 unidade Lugeon (U.L.) corresponde um valor de k entre 1×10^{-5} e 2×10^{-5} cm/s para sondagens com diâmetros entre os 5 e os 10 cm.

A experiência mostrou que para valores de coeficiente de absorção inferiores a uma unidade Lugeon é impossível injetar qualquer calda de cimento, pelo que foi considerado que um maciço rochoso é “impermeável” sempre que a permeabilidade é inferior a 1 Lugeon.

Em regra, estes ensaios vão sendo realizados à medida que o furo vai prosseguindo, em trechos de comprimento variável conforme a permeabilidade do maciço e a capacidade da bomba de injeção, mas mais vulgarmente em trechos com 5 m ou 3 m de comprimento. Neste caso, o limite inferior do trecho é o fundo do furo, no momento do ensaio, e o limite superior definido pela posição de um obturador de couro ou borracha (Figura 7a) que tem por missão impedir que a água injetada no furo se escape entre o obturador e a parede respetiva. Convém que o obturador seja suficientemente comprido (entre 0,5 e 1 m) de forma a garantir uma boa vedação do troço do furo. Quando o ensaio é realizado num trecho intermédio do furo de sondagem utiliza-se um obturador

duplo (Figura 7b), ou em casos especiais um obturador quádruplo (Figura 7c), que define os limites superior e inferior do trecho a ensaiar.

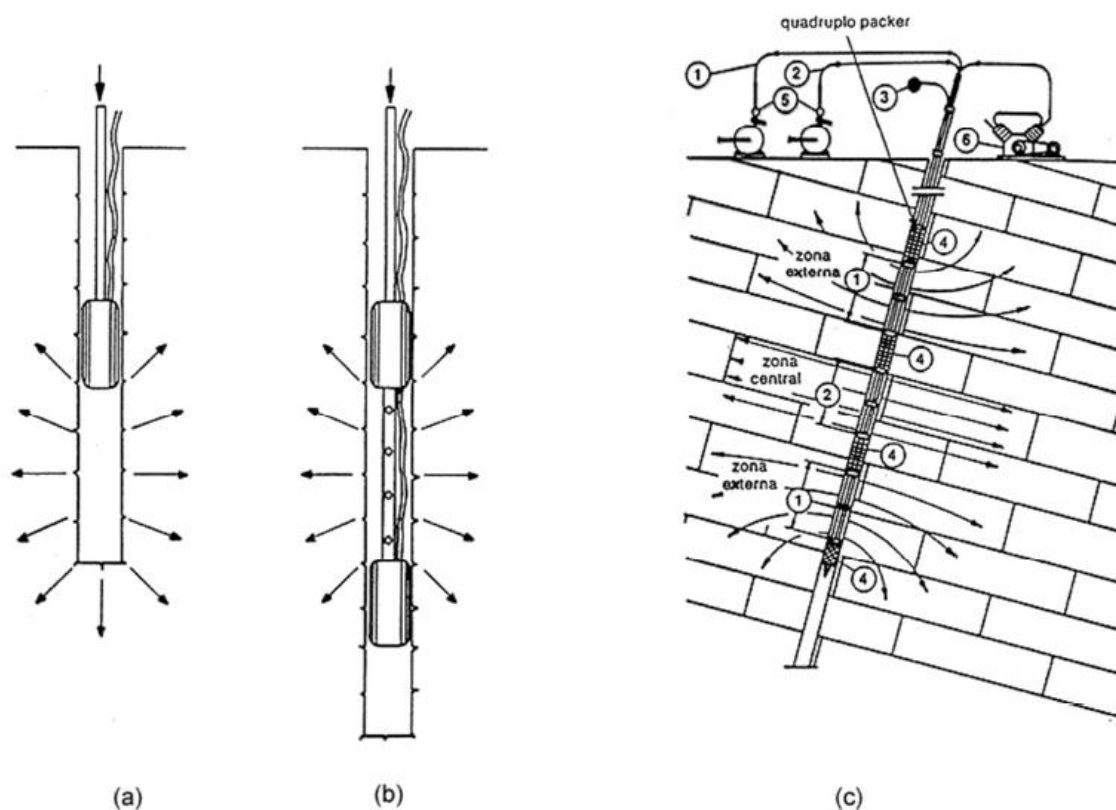


Figura 7 – Ensaio Lugeon: a) obturador simples; b) – obturador duplo; c) obturador quádruplo (adaptado dos apontamentos da disciplina de Geologia da Engenharia, 2013)

Desde que os ensaios tenham sido corretamente realizados, a informação obtida é de grande utilidade na definição do regime hidrogeológico do maciço e da sua fraturação, e no projeto dos trabalhos de impermeabilização dos maciços, quando considerados necessários. Feitas as correções os valores que se obtêm permitem, por um lado ajuizar as características de permeabilidade do maciço e, conseqüentemente, a necessidade de tratamento de impermeabilização e, por outro, dar informações no que respeita ao regime de escoamento instalado.

Quando se verifica proporcionalidade entre os caudais e as pressões está-se na presença de um escoamento laminar (regido pela lei de Darcy $v = k.i$) que, no caso de maciços rochosos, é característico de descontinuidades pouco abertas ou preenchidas por materiais granulares. É o caso da Figura 8a onde se representa esquematicamente o resultado de um ensaio em que as descontinuidades ou não tinham enchimento ou o enchimento não foi sensível à percolação durante o ensaio.

Há casos, no entanto, em que a injeção da água sob pressão conduz quer a colmatção progressiva das descontinuidades por arrastamento de material (Figura 8b) e outros em que o aumento de

pressão provoca arrastamento dos materiais de enchimento e, conseqüentemente, lavagem das descontinuidades (Figura 8c).

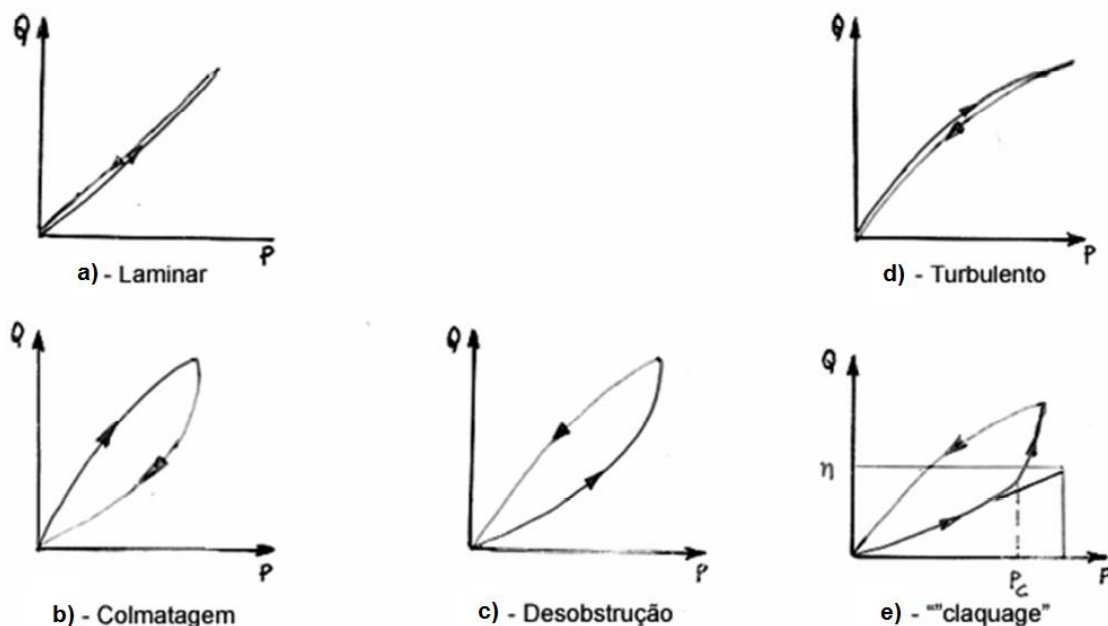


Figura 8 – Curvas típicas obtidas através de ensaios Lugeon (adaptado dos apontamentos de Geologia da Engenharia, 2013)

Quando não há proporcionalidade na curva Q-P está-se, em princípio, em presença de um escoamento turbulento, que é regido pela lei de Chezy quando os gradientes são proporcionais ao quadrado das velocidades ($v = k i$) e a curva obtida é do tipo da representada na Figura 8d. No entanto, este resultado pode dever-se apenas à abertura elástica da fratura como consequência em certos casos da elevada pressão de injeção. Neste caso, há, em regra, quando se diminui a pressão, um retorno de água absorvida pelo maciço que se reflete numa contrapressão.

A mudança de curvatura, como a representada na Figura 8e, corresponde à situação de um incremento brusco do caudal a partir de determinada pressão, será correspondente à situação de um incremento brusco do caudal a partir de determinada pressão, será representativa do fenómeno de fraturação hidráulica. Este fenómeno designa-se usualmente por “*claquage*” e está associado à criação de novas superfícies de descontinuidades geradas pelo incremento das pressões de injeção.

3.4.1. EVOLUÇÃO DO ENSAIO TIPO LUGEON

O ensaio tem sido alvo de várias evoluções melhorando a sua aplicação, precisão e análise de resultados. As principais foram:

- É possível adaptar o comprimento do trecho ensaiado à fraturação existente no maciço. Um dos motivos para a incerteza do resultado é que o mesmo resultado final pode ser

obtido por uma descontinuidade aberta ou para muitas fechadas, esta medida permite uma melhor adaptação do ensaio aos diferentes cenários;

- A introdução de vários patamares de pressão, através deste método pode-se associar a evolução das pressões com a evolução do caudal escoado, deste modo pode-se saber o tipo de escoamento ou as tendências de comportamento do maciço;
- Também os valores da pressão a aplicar foram alvo de uma evolução, adaptando a sua magnitude às condições do maciço rochoso. Quando estes são de fraca qualidade, em especial quando são mais superficiais, devem-se aplicar pressões bastante inferiores para que se evite a fracturação do maciço. Da mesma forma, durante as injeções do ensaio é possível utilizar pressões crescentes em profundidade devido ao estado de tensão; no caso de se tratar de maciços competentes também é possível aplicar pressões superiores a 1 MPa se esta for bastante inferior à pressão crítica.

3.4.2. EXECUÇÃO DO ENSAIO LUGEON

O ensaio Lugeon é um ensaio importante para o acompanhamento do tratamento por injeções de uma fundação. A partir da análise dos resultados da condutividade hidráulica deste ensaio, é possível obter a tendência do comportamento do maciço na fase de injeções.

Para a realização do ensaio define-se à partida uma pressão máxima (P_{max}), esta pressão deve ser escolhida de modo a que, no caso de existirem descontinuidades sub-horizontais, não sejam ultrapassadas as pressões de confinamento à profundidade de realização do ensaio, desta forma é muito improvável verificarem-se fenómenos de fracturação ou levantamento hidráulico.

Uma expressão com utilização comum para o cálculo de P_{max} é a equação (1) de Quiñones-Rozo (2010)

$$P_{max} = D * 22,6 \text{ (kPa/m)} \quad (1)$$

Onde D é a distância à superfície medida na vertical ou recobrimento lateral se for numa encosta.

Como já foi dito, geralmente o ensaio é realizado em cinco fases com uma magnitude de pressão associada a cada uma delas. A variação da pressão divide-se em três patamares, um patamar de pressão baixa (a), um patamar intermédio (b) e o patamar final com $P_{max} = P_3$. A ordem de aplicação é ($P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1$) e cada patamar tem uma duração de 10 minutos.

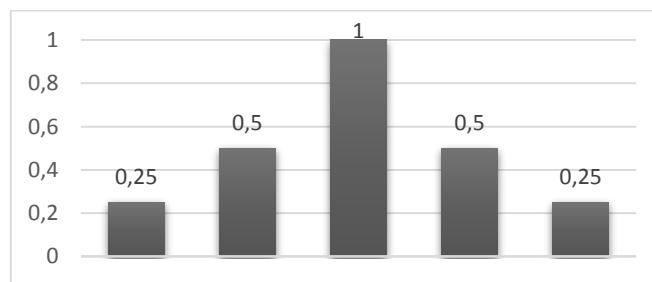


Figura 9 – Patamares típicos de pressão em percentagem de $P_{máx}$

Durante o ensaio são registados os caudais escoados por minuto e posteriormente é utilizado o valor do caudal do terceiro patamar (ou o volume em função ao tempo) para o cálculo da unidade Lugeon de cada trecho pela fórmula.

$$1 * LU = \frac{Q}{l} = \frac{V}{t \times l} \quad (2)$$

Dadas as características de percolação num maciço rochoso fraturado, facilmente se compreende que, muito mais do que no caso de ensaios de permeabilidade em maciços terrosos, a orientação adequada dos furos de sondagem onde são realizados os ensaios é indispensável para que os ensaios sejam de facto representativos. Erroneamente verifica-se, por vezes, que se pretende que ensaios de absorção de água realizados em furos de sondagem com a mesma inclinação da fraturação preponderante sejam informativos quanto à permeabilidade desse maciço.

A Tabela 4 relaciona as condições típicas associadas com diferentes valores de Lugeon, bem como a precisão do valor do ensaio em função da magnitude dos valores segundo Houlsby (1976).

Tabela 4 – Relação entre absorção hidráulica e as características das descontinuidades (Houlsby, 1976)

U.L.	Classificação	Condutividade Hidráulica	Condição das Descontinuidades	Incrementos de U.L. significativos
1-5	Baixa	1×10^{-5} - 4×10^{-5}	Fechadas	1
5-10	Moderada	4×10^{-5} - 8×10^{-5}	Poucas Parcialmente Abertas	2
10-15	Média	8×10^{-5} - $1,2 \times 10^{-4}$	Algumas Abertas	5
15-50	Alta	$1,2 \times 10^{-4}$ - 4×10^{-4}	Muitas Abertas	10
50-100	Alta	4×10^{-4} - 8×10^{-4}	Muitas Abertas	30

3.4.3. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A pressão de água é lida em regra, num manómetro colocado à superfície, junto à boca do furo, e a quantidade de água absorvida é lida num contador vulgar ou, na sua falta, medida pela descida de nível num reservatório de secção conhecida. Calculadas as absorções em litros por minuto e por metro para cada patamar de pressões utilizado no ensaio, depois de proceder à respetiva correção resultante das leituras das pressões se fizerem junto à boca do furo, traçam-se gráficos de “pressão” versus “absorção” (Q-P) que permitem avaliar o regime de escoamento que se instalou no maciço como consequência das características físicas e dimensões das descontinuidades interessadas.

Para que as pressões utilizadas na elaboração dos gráficos sejam da ordem de grandeza das que solicitam o maciço na zona do ensaio torna-se necessário fazer, em boa parte dos casos (nomeadamente em furos profundos em que o nível freático está bastante abaixo da superfície do

terreno), uma correção que é constituída por duas parcelas uma das quais, aditiva, correspondente à pressão resultante da coluna de água entre a boca do furo (onde está instalado o manómetro) e o nível freático e a outra, subtrativa, corresponde às perdas de carga através da canalização utilizada (diâmetro, rugosidade, caudal, etc.)

A interpretação dos resultados do ensaio Lugeon, como regra, tem como guia prático o trabalho realizado por Houlby (1976) que recentemente foi revisto por Quiñones-Rozo (2010), estão representadas respetivamente na Tabela 5 e na

Tabela 6.

A abordagem de Houlby (1976), que foi desenvolvida com o objetivo estabelecer requisitos para as injeções, propôs que a condutividade hidráulica representativa do maciço se baseie nos valores de Lugeon.

Houlby (1976) estabeleceu cinco grupos de comportamento típico observados na prática:

- Escoamento laminar: A condutividade hidráulica é independente da pressão de água injetada. Este tipo de comportamento é característico em maciços de boa qualidade e com valores de Lugeon relativamente baixos;
- Escoamento turbulento: A condutividade hidráulica diminui com o aumento da pressão de água. Este tipo de comportamento é característico em maciços com descontinuidades abertas a muito abertas;
- Dilatação: A condutividade hidráulica é igual para pressões baixas a médias, no entanto para a pressão máxima a condutividade hidráulica aumenta substancialmente. Este comportamento, que também pode acontecer para pressões médias, ocorre quando a pressão aplicada na água supera a tensão principal mínima do maciço, causando então uma dilatação temporária (hydro-jacking) das fissuras da rocha. A dilatação aumenta a secção disponível para a circulação de água aumentando a condutividade;
- Lavagem: A condutividade hidráulica aumenta durante a duração do ensaio independentemente das pressões de injeção da água. Este comportamento indica que as pressões de injeção introduzem alterações permanentes possivelmente danificando as propriedades do maciço rochoso, normalmente isto acontece devido à lavagem dos preenchimentos das descontinuidades ou aos movimentos permanentes da rocha;
- Colmatação: A condutividade hidráulica diminui durante a duração do ensaio independentemente das pressões de injeção da água. Este comportamento indica três diferentes cenários: a água preenche progressivamente descontinuidades não persistentes ou isoladas; existe expansão das descontinuidades; ou existe a criação de coágulos nas descontinuidades devido a detritos de fração fina que possam estar presentes.

Tabela 5 – Interpretação dos resultados dos ensaios de Lugeon (proposto por Houlby, 1976)

Comportamento	Patamares de pressão do ensaio	Padrão dos valores de Lugeon	Descrição	Valor de Lugeon a considerar
Laminar			Todas as U.L. são semelhantes, independentemente da pressão de injeção.	Média das U.L. de todos os patamares do ensaio.
Turbulento			As U.L. evoluem em razão inversa à pressão.	A U.L. correspondente à pressão máxima.
Dilatação			As U.L. variam em razão direta com as pressões de água.	A U.L. correspondente aos patamares baixo ou médio (patamares 1, 2, 4, 5).
Lavagem			As U.L. aumentam progressivamente durante o ensaio.	A U.L. máxima observada (patamar 5).
Colmatção			As U.L. diminuem progressivamente durante o ensaio.	A U.L. final (patamar 5).

Esta primeira interpretação dos ensaios de Lugeon, proposta por Houlsby (1976), foi recentemente revista por Quiñones-Rozo (2010).

Nesta interpretação dos resultados, são aproveitadas as capacidades dos equipamentos mais atuais de realizarem um registo contínuo dos caudais e da pressão, representando de uma forma mais clara as tendências de absorção do maciço.

Quiñones-Rozo (2010) introduz na representação do ensaio um fator de pressão (Ψ) que é obtido pela divisão P/P_0 . Os resultados do ensaio Lugeon passam a ser representados em perda de caudal vs fator de pressão, estes conjuntos de informação, de uma região com U.L. constante, têm a particularidade de serem representados segundo uma reta cujo declive representa a permeabilidade. Por esse motivo, Quiñones-Rozo (2010), propôs a adição de retas representativas de valores Lugeon, permitindo assim uma maior facilidade e rapidez na leitura dos resultados (Figura 10)

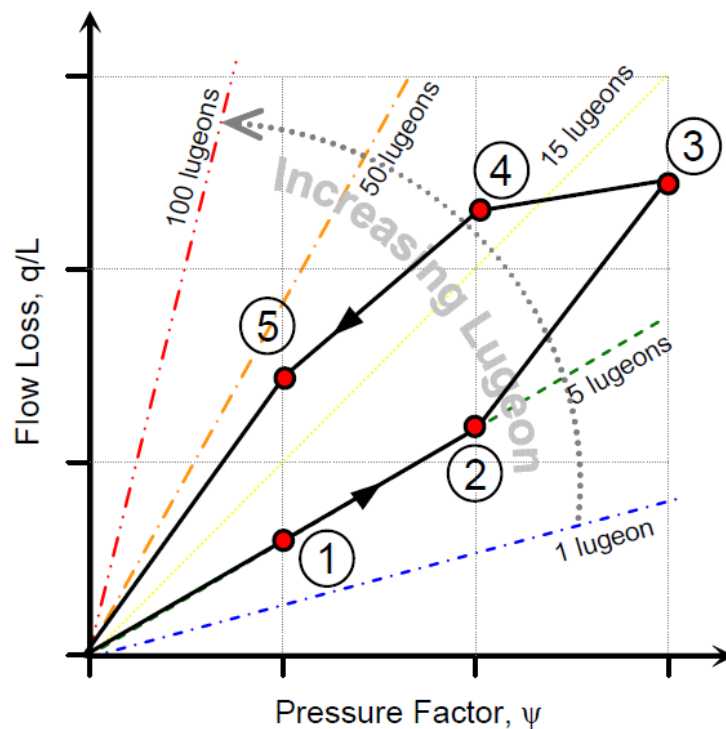
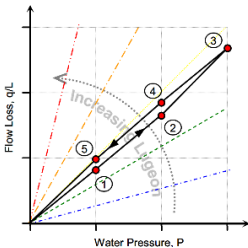
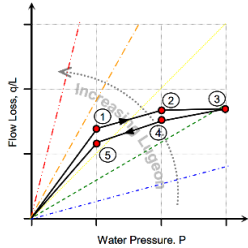
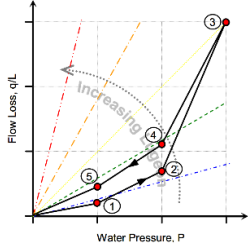
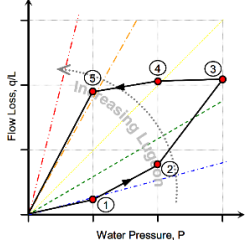
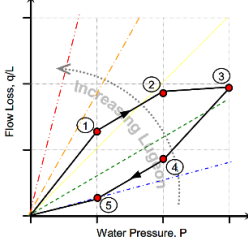


Figura 10 – Interpretação dos resultados do ensaio Lugeon proposta por Quiñones-Rozo (2010)

Tabela 6 – Procedimento de interpretação do ensaio de Lugeon (proposto por Quiñones-Rozo, 2010)

Comportamento	Evolução da Absorção vs Evolução da Pressão	Descrição	Valor de Lugeon representativo
Laminar		Todas as U.L. são semelhantes, independentemente da pressão de injeção.	Média das U.L. de todos os patamares do ensaio.
Turbulento		As U.L. evoluem em razão inversa à pressão.	Se a pressão de água esperada for desconhecida utilizar a U.L. correspondente à pressão de água intermédia (patamares 2 ou 4).
Dilatação		As U.L. variam em razão direta com as pressões de água.	Se a pressão de água esperada for desconhecida utilizar a U.L. correspondente aos patamares baixo ou médio (patamares 1, 2, 4 ou 5).
Lavagem		As U.L. aumentam progressivamente durante o ensaio.	A U.L. máxima observada (patamar 5).
Colmatação		As U.L. diminuem progressivamente durante o ensaio.	A U.L. final (patamar 5).

3.4.4. LIMITAÇÕES DO ENSAIO LUGEON

Uma das principais limitações do ensaio Lugeon é o reduzido volume de rocha abrangido por cada ensaio. Foi estimado, por Bliss e Rushton (1984 in Quiñones-Rozo, 2010), que cada ensaio de Lugeon realizado em trechos de três metros de comprimento, está restrito a um raio de aproximadamente nove metros centrado no furo do ensaio.

Devido às limitações espaciais não se deve obter a condutividade hidráulica através de soluções analíticas fechadas pois estas foram desenvolvidas na premissa que há um grande conhecimento do maciço envolvente. Para além disto as soluções analíticas requerem o conhecimento do nível freático, no entanto é frequentemente observado que a medição do nível freático é influenciada pelos grandes volumes de água injetados durante o processo de furação.

Um problema frequente, é a confusão entre a permeabilidade de Lugeon e a capacidade de injetar um dado maciço rochoso. De facto, o ensaio de Lugeon pode ser útil na definição da evolução da permeabilidade hidráulica, e daí avaliar a eficácia dos trabalhos realizados. No entanto, este não define a injetabilidade do maciço em si. Este facto prende-se com diferentes aspetos:

- A água é um fluido Newtoniano ao contrário da calda que é Binghamiana;
- A água tem uma estrutura molecular, por seu lado a calda é água com partículas de cimento em suspensão;
- A água consegue entrar em descontinuidades muito mais finas do que a calda;
- Os testes de absorção de água fornecem um caudal, enquanto que nas injeções de calda só se pode registar o volume absorvido;
- Os testes de água têm uma duração determinada, mas as injeções têm uma duração que se pode estender além de qualquer limite de tempo;
- Os níveis de pressão utilizados nos testes de absorção de água e na injeção de calda são diferentes.

3.5. PROCEDIMENTO DE INJEÇÃO

Antes de se dar início às injeções é muito importante que se faça a remoção do material solto resultante da furação e por isso, tal como nas injeções para consolidação, recorre-se a procedimentos de lavagem e de limpeza em todos os furos. Na prática, devido à grande extensão das barragens, desde que se garanta uma distância suficiente para que não exista risco de interconexão entre procedimentos e se cumpra a sequência estabelecida para estes, torna-se possível que sejam realizados simultaneamente.

3.5.1. FASEAMENTO DAS INJEÇÕES

Quando se injetam furos com comprimentos que ultrapassam os 10 m é quase sempre preferível a sua divisão em trechos menores, promovendo assim uma maior qualidade no tratamento das

descontinuidades, em especial as que são menos abertas. Ao utilizarem-se trechos menores, regra geral, resulta numa maior eficiência de tratamento por diversos motivos:

- A ocorrência de decantação das partículas de cimento é controlada, por ser um processo mais rápido de injeção;
- Há um maior controlo das pressões, permitindo utilizar pressões mais baixas à superfície e crescentes em profundidade;
- E o ajuste do procedimento à variação do tipo de fraturas no maciço é facilitado, por se tratar de comprimentos menores permite uma reação mais rápida e apropriada.

O sequenciamento das injeções destes trechos é pensado e escolhido, sempre com o objetivo de se atingir a melhor solução com economia e eficiência. Necessariamente esta é selecionada em função das características do maciço de fundação.

De seguida estão descritos diferentes faseamentos dos trabalhos de injeções analisados por Houlsby (1990), onde este destaca as suas vantagens e as desvantagens.

3.5.1.1. DESCENDENTE SEM OBTURADOR

Esta é uma técnica que, segundo Houlsby (1990), permite atingir um nível muito elevado de impermeabilização do maciço, pois cada trecho é furado e injetado antes da execução do trecho inferior seguinte. A ausência de um obturador permite que os trabalhos de injeção sejam controlados à superfície.

Um grande benefício desta técnica é a de proporcionar autoverificação da qualidade do tratamento. Isto acontece porque os trechos superiores estão submetidos a pressões superiores que são aplicadas quando do tratamento dos trechos inferiores. Então se o tratamento nos trechos mais superficiais tiver fragilidades, a aplicação destas pressões superiores permite identificar a sua localização, pelo ressurgimento calda à superfície através delas, para que então possam ser reinjetadas.

Uma das principais vantagens deste método é a de permitir realizar injeções em qualquer tipo de maciço, de tal modo que é a técnica recomendada em maciços de muito baixa qualidade.

Apesar as vantagens apresentadas, esta técnica implica um tratamento com custos acrescidos e maior duração pois a constante necessidade de troca de equipamentos de furar e de injetar torna o procedimento moroso e complexo.

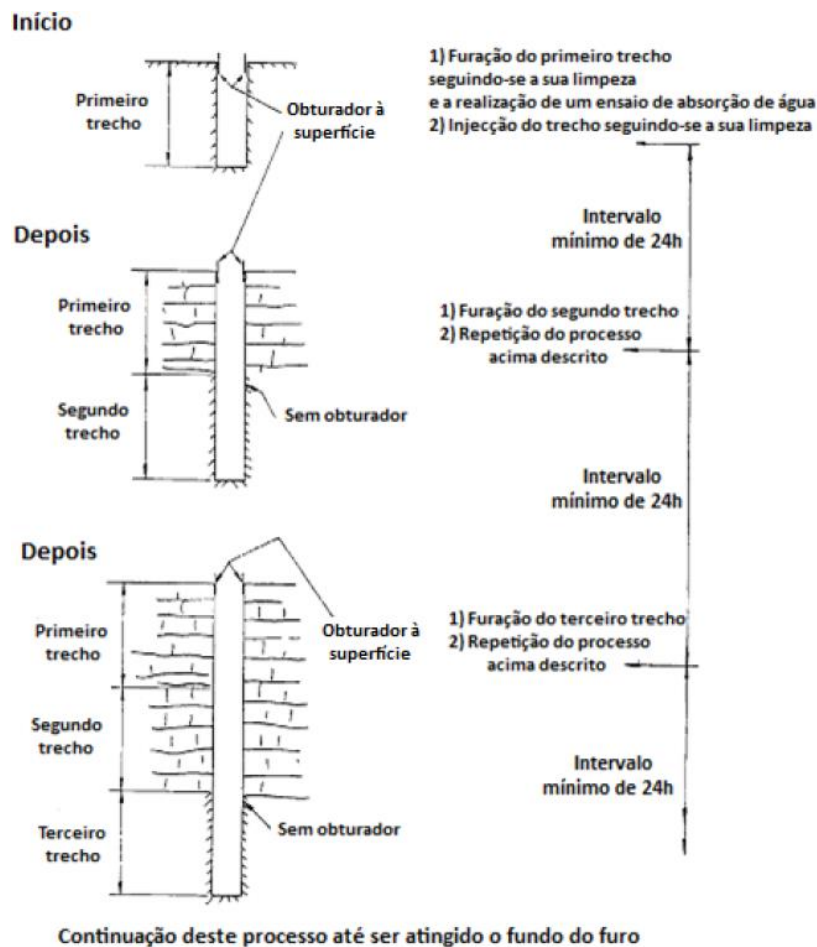


Figura 11 – Representação esquemática da técnica descendente sem obturador segundo Houlsby (1990)

3.5.1.2. DESCENDENTE COM OBTURADOR

Esta técnica tem como única modificação em relação à anterior a adição de um obturador na fronteira superior de cada trecho. O objetivo principal da adição do obturador é a de proteger o solo já tratado do efeito fraturante das pressões que são aplicadas nos trechos seguintes. Esta alteração permite ter pressões superiores ao caso descendente sem obturador, por haver uma separação do solo tratado do não tratado, e daí resultar possivelmente um melhor tratamento.

Houlsby (1990), no entanto, refere que a introdução do obturador adiciona um leque de problemas que podem ocorrer. Existe a possibilidade de o obturador bloquear ou dificultar a passagem da própria calda para a injeção, dificulta a remoção da água que segrega da calda ou até pode acontecer cimentação do obturador dentro do furo por causa de eventuais fugas de calda por cima deste.

A introdução do obturador é muitas vezes um estorvo para métodos de controlo de movimentos e não permite que esta técnica seja utilizada em maciços com risco de colapso, nem em furos que não sejam circulares. O obturador remove também os aspetos auto reparadores presentes quando este não se utiliza e ainda aumenta o custo final em relação ao anterior.

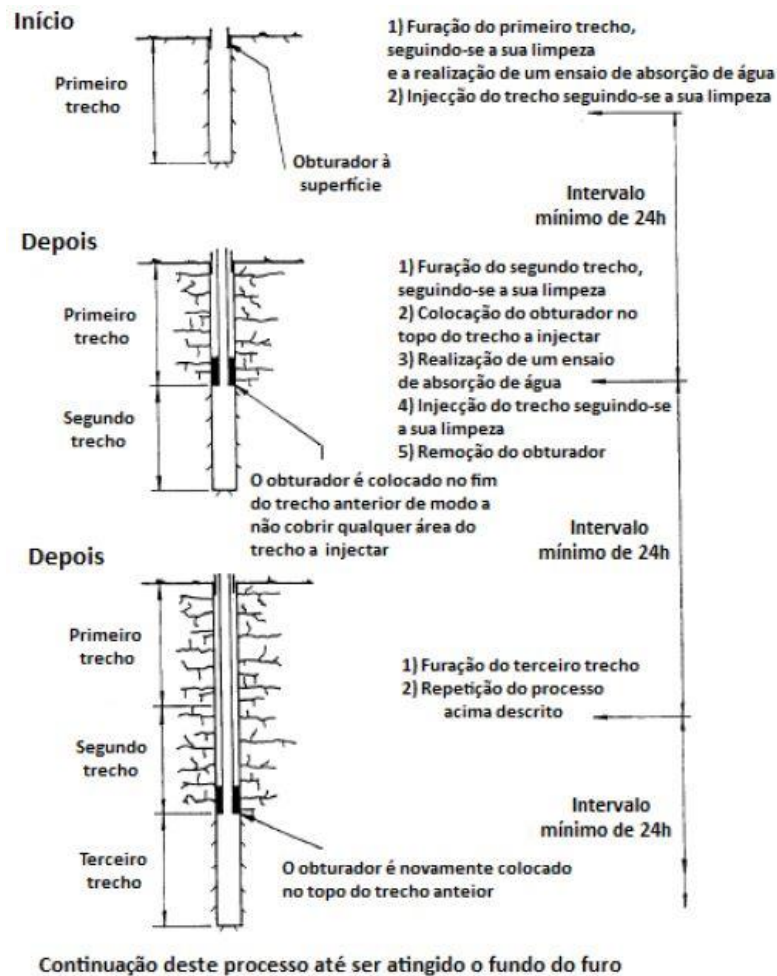


Figura 12 – Representação esquemática da técnica descendente com obturador segundo Houlsby (1990)

3.5.1.3. ASCENDENTE COM OBTURADOR

Esta técnica consiste na execução do furo de uma só vez e depois fazem-se as injeções, como o nome indica, no sentido ascendente com um obturador na secção superior do trecho.

Esta técnica é a mais económica e mais rápida nas situações em que o maciço de fundação apresenta muito boas características por só ser preciso instalar tanto o equipamento de furação como o de injeção uma vez para cada furo. No entanto a sua utilização em maciços de não tão boa qualidade tem a consequência de sacrificar tanto a sua eficácia como a economia, pois nestes casos existe uma certa dificuldade em garantir que resulte da furação uma secção circular regular para o obturador. Por causa deste faseamento da execução consistir na realização da furação de uma só vez também não se pode aplicar em maciços com risco de colapso. Por fim, ainda tem os possíveis problemas associados ao obturador, referidos no método anterior.

É portanto uma técnica que possibilita soluções que aliam a qualidade com a economia se as condições do maciço assim o permitirem.

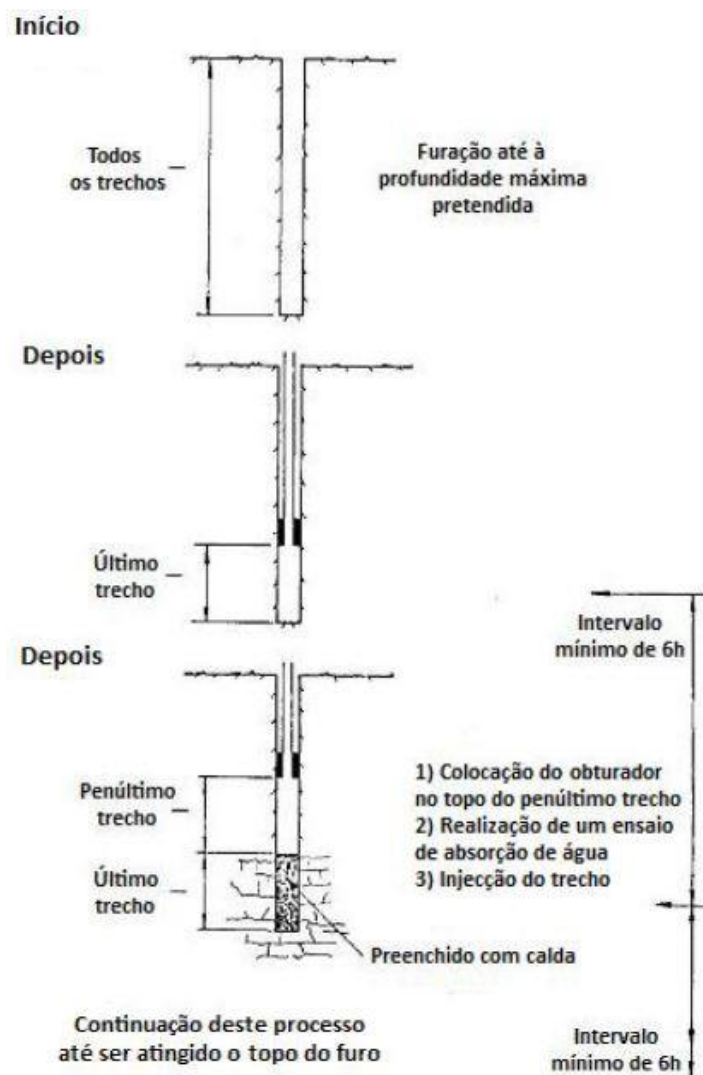


Figura 13 – Representação esquemática da técnica ascendente com obturador segundo Houlsby (1990)

3.5.2. DEFINIÇÃO DO COMPRIMENTO DOS TRECHOS

Para que a execução da cortina de impermeabilização seja eficaz e económica, é essencial que a definição do comprimento de cada trecho nos furos varie consoante diversos fatores relacionados com o maciço.

Uma escolha de trechos com um comprimento mais curto ($<3\text{m}$) implica uma melhor qualidade do tratamento, enquanto que se forem trechos maiores ($>5\text{m}$) em teoria há uma maior economia. No entanto em maciços que tenham uma certa variação das suas características, especialmente quanto ao espaçamento e à abertura das descontinuidades, quanto maior o comprimento dos trechos utilizados maior é o risco para que a escolha inicialmente mais económica se traduza na mais dispendiosa pois para cumprir a permeabilidade definida em projeto é preciso a realização de furos adicionais.

Segundo Warner (2004), regra geral o comprimento dos trechos pode aumentar em profundidade devido à tendência do maciço e das suas descontinuidades melhorar em sua função. Este defende a utilização de trechos de 1,5-3 m de comprimento quando se situam perto da superfície e para profundidades maiores, a utilização de comprimentos superiores na ordem dos 3-6m. Propõe ainda, para trechos que intersetem maciços muito fraturadas ou que sejam zonas muito importantes, a utilização de comprimentos baixos na ordem de 0,6m.

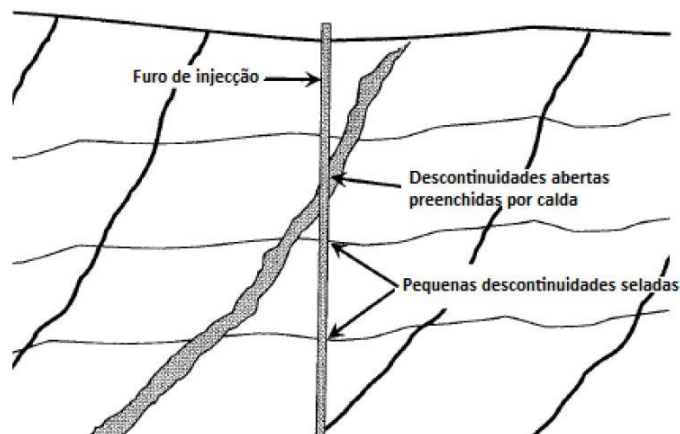


Figura 14 – Exemplo de variação de condições ao longo de um furo (adaptado de Warner, 2004)

Uma boa escolha de comprimentos passa então pela sua adaptação e adequação às características do maciço. Um fator importante a considerar é o da experiência do operador que, pelo seu conhecimento, permite uma maior capacidade de adaptação e pode contribuir para atingir uma melhor eficiência nos trabalhos.

Então como regra geral o comprimento dos trechos adotado nas injeções deve ser mais curto em zonas em que o maciço é de fraca qualidade, em zonas importantes da fundação, em zonas com fraturação particularmente mais persistente ou então quando as características dos maciços são muito variáveis. Nas restantes situações em que o maciço é mais homogêneo e tem uma distribuição mais regular das fraturas é possível utilizar comprimentos menos conservadores.

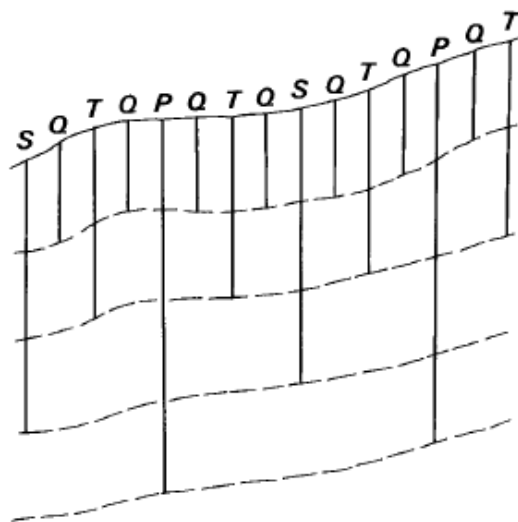
Conclui-se que então que para os trabalhos sejam executados com os comprimentos dos trechos mais adequados, deve haver uma definição inicial bem ponderada e durante as injeções, caso sejam feitas por um operador experiente, deve existir um diálogo entre este e o projetista para que haja a capacidade de adaptação à variabilidade das características do maciço rochoso a tratar. Simultaneamente se a pré-definição dos trechos típicos for razoavelmente conservadora pode salvaguardar custos adicionais da realização de furos adicionais.

3.5.3. DEFINIÇÃO DO ESPAÇAMENTO DOS FUROS

A definição dos espaçamentos dos furos depende sobretudo da importância da obra que se está a tratar, isto é, a qualidade que a cortina de impermeabilização terá que ter.

Em nenhum dos casos anteriores se obtém uma cortina de impermeabilização eficaz, e por isso não é adequada nem aceitável a sua aplicação em barragens importantes.

Depois de o procedimento da furação primária estar concluída este repete-se, sempre numa posição intermédia em relação aos furos anteriores. A repetição é feita tantas vezes quantas forem necessárias denominando-se sequencialmente como secundária, terciária, quaternária, etc. Uma vez atingida a permeabilidade pretendida este processo iterativo é interrompido e a solução final está atingida.



A profundidade das furações posteriores à primária é definida pelos valores do ensaio à absorção realizado em cada furo. Houlsby (1990) diz que a furação deve ultrapassar o troço mais profundo dos furos adjacentes, em um comprimento de 5m, que tenha registado absorções superiores ao limite estabelecido como máximo. Ou seja as furações são tendencialmente menos profundas a cada repetição realizada.

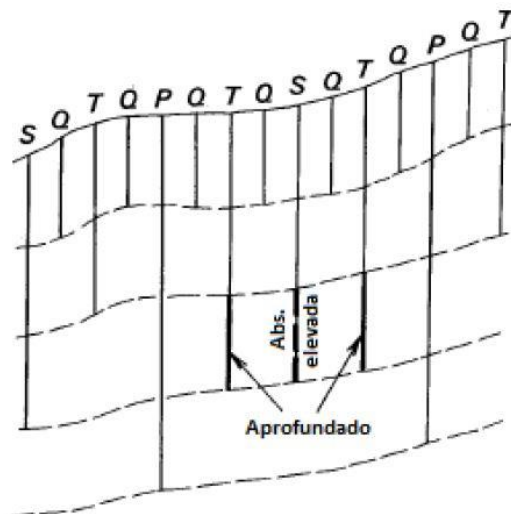


Figura 16 – Exemplo de um prolongamento da furação causado por absorção elevada na proximidade (adaptado de Houlsby, 1990)

Esta metodologia proposta por Houlsby (1990) tira partido do facto de que geralmente os maciços apresentam uma evolução positiva das suas características em profundidade, permitindo localizar o tratamento apenas às regiões de menor qualidade associando eficiência e economia no resultado final da execução.

3.6. CONTROLO DE QUALIDADE DAS MISTURAS

O controlo de qualidade é um aspeto importante na execução do tratamento de fundações por injeções, e a sua função principal é a de garantir que se atingem os objetivos propostos antes da execução.

A sua execução traduz-se na realização de um conjunto de ensaios para controlar a água de fabrico de caldas em relação às suas propriedades físicas e químicas, deve existir um controlo sobre o processo de obtenção dos inertes para a produção dos cimentos, também as propriedades das areias utilizadas em injeções de argamassas devem ser avaliadas e ainda as próprias caldas de injeção e os equipamentos para realizar os trabalhos devem ser alvo de um controlo igualmente.

Os critérios de aceitação das propriedades do cimento e da água são os definidos nos documentos normativos, enquanto os critérios de aceitação para as propriedades das caldas de injeção são obtidos por ensaios de caracterização, de onde se retiram intervalos de tolerância para a viscosidade, a exsudação e a precisão do doseamento para o cimento, os adjuvantes e para a água.

Deve existir um plano da qualidade de obra que descreve as responsabilidades da equipa executante assim como a planificação da qualidade da obra, a descrição dos procedimentos de trabalho em estaleiro e a descrição das inspeções e dos ensaios.

3.7. DURABILIDADE DAS CORTINAS DE IMPERMEABILIZAÇÃO

Independentemente da qualidade da execução das cortinas de impermeabilidade, estas não são perenes, e por isso mais tarde ou mais cedo ocorre um arrastamento e consequente lavagem das partículas de cimento que constituem a cortina. Sem esquecer o facto de que este fenómeno ocorre muito lentamente e pode demorar dezenas de anos até ter um impacto significativo nos casos de boa execução.

Este processo de lavagem da cortina, ainda não é claro e, por isso não há certezas de como se processa, mas estima-se que começa pela lenta dissolução do dióxido de cálcio (CaO_2) na água escoada como hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$). No contacto direto com o ar, o carbonato de cálcio (CaO_3) é formado e dependendo das condições de escoamento pode sair da solução. Outro mecanismo de lavagem pode começar pelo contacto de água com dióxido de carbono, criado pelas bactérias no subsolo, daí resulta um ácido fraco (H_2CO_3) que combina com o excesso de dióxido de cálcio para resultar em CaO_3 .

Se existir uma fissura num maciço rochoso que esteja parcialmente tratado com calda e por isso com vazios nos quais existe passagem de água, as partículas de cimento expostas ao caudal vão começar a sofrer arrastamento. O grau de alteração é expectável que evolua muito lentamente, particularmente se apenas as fissuras mais apertadas estiverem disponíveis para a circulação de água. Nestas condições mesmo que o arrastamento implicasse alguma alteração, algumas das partículas inertes na calda de cimento tendencialmente irão acumular-se nestes vazios e manter a condutividade hidráulica do maciço relativamente baixa.

3.8. DRENAGEM E PIEZOMETRIA

A drenagem e a piezometria são dois aspetos essenciais no tratamento de fundação, com consequências no aproveitamento de uma barragem.

Os drenos interseam cursos de água subterrâneos, e possibilitam o controlo da razão do fluxo. São instrumentos de grande utilidade, pois à custa destes, pode-se compreender como se procede a circulação de água num dado maciço rochoso.

Estes instrumentos devem sempre ser colocados depois da conclusão da cortina de impermeabilização e situados a jusante desta. Tornando-se um meio para avaliar a sua efetividade permitindo simultaneamente baixar as subpressões na base da barragem aumentando o seu nível de segurança.

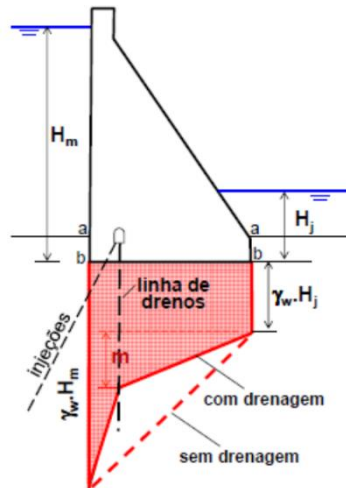


Figura 17 – Alteração nas subpressões provocada pelos drenos (Souza, 2013)

Os piezómetros devem ser colocados a jusante dos drenos e medem o nível freático, ou a cota piezométrica, permitindo a sua correlação com os níveis de água do rio ou a quantidade de precipitação.

A partir da informação que ambos fornecem pode-se perceber o funcionamento hidrológico sob a barragem e permitem identificar eventuais problemas que apareçam.

Para o dimensionamento destes aparelhos, as Normas de Projeto das Barragem (1993) definem que os caudais drenados na fundação, embora possam atingir valores mais elevados em zonas muito localizadas, correspondam a valores médios da permeabilidade na zona da cortina de impermeabilização não superiores a 1 Lugeon. Dizem ainda que as subpressões na base das barragens, designadamente no caso de barragens de gravidade ou de abóbada espessa, na secção correspondente à cortina de drenagem, sejam da ordem de um terço da pressão a montante.

METODOLOGIAS DE DIMENSIONAMENTO

Neste capítulo são abordadas duas possíveis metodologias de dimensionamento de uma cortina de impermeabilização que são o Método de Houlsby (1976, 1990) e o Método de Gin (1993).

4.1. MÉTODO DE HOULSBY

Esta metodologia foi proposta em 1976 por Houlsby que depois a atualizou em 1990.

4.1.1. NECESSIDADE DE TRATAMENTO

Houlsby, na sua metodologia, desenvolveu uma árvore de decisão (Figura 18) com o objetivo de avaliar a necessidade de tratamento em variadas situações. Segundo Houlsby (op. cit.), este esquema é apenas um guia geral, e como tal, serve apenas para direcionar a linha de raciocínio, sendo necessário adaptá-lo a cada uma das suas aplicações.

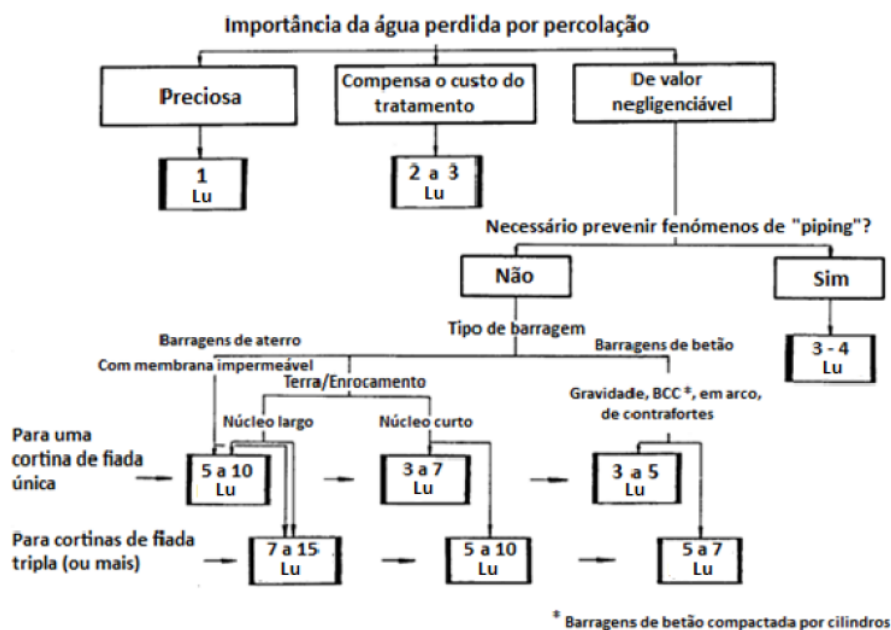


Figura 18 – Fluxograma para definição da necessidade de execução de cortina de impermeabilização (adaptado de Houlsby, 1990)

O esquema faz a avaliação através dos valores da absorção hidráulica, em U.L., da fundação e relaciona esses valores com necessidades diferentes de atuação. Se a absorção inicial for inferior ao valor correspondente da exigência escolhida pode-se evitar o tratamento.

No primeiro nível é questionada a importância que a água armazenada tem. Naturalmente nos casos em que esta é valiosa vai ser atribuída a classificação mais restrita (1 U.L.). O seu valor pode estar associado à sua escassez ou então por esta ser acumulada por um dispendioso processo de bombeamento, é necessário então haver um estudo económico comparando as perdas de água com o custo da realização de diferentes tipos de tratamento. No caso das perdas de água por percolação terem uma importância negligenciável avança-se para o nível seguinte.

No segundo nível é avaliada sobretudo a segurança da barragem quanto a questões de arrastamento devido à circulação da água sob a fundação. Este risco tem especial importância em maciços com fracas propriedades onde há uma grande frequência de descontinuidades. Uma permeabilidade máxima de 4 U.L. é a recomendada por Houlsby para prevenir este problema.

O último nível deste esquema é para situações em que nem a água é valiosa nem a sua circulação sob a fundação tem um efeito considerável na segurança, estabelecendo valores máximos para a condutividade hidráulica em função do tipo de barragem e da quantidade de fiadas com que se materializa a cortina de impermeabilização.

4.1.2. COMO EXECUTAR AS INJEÇÕES

Os princípios fundamentais para a definição e execução das injeções, na metodologia proposta por Houlsby (1990) são:

- Escolher uma calda de cimento inicial adequada;
- Definir a pressão máxima do processo;
- Começar as injeções sempre com uma pressão baixa, durante uns minutos, para verificar a existência de fugas para a superfície, ligações com outros furos ou movimentos da rocha;
- Aos 15 minutos verificar o volume absorvido pelo maciço para verificar a necessidade de espessar a calda,
- Controlo permanente das características da calda durante as injeções;
- Depois de se atingir a nega, manter a pressão durante 15 minutos adicionais.

4.1.2.1. CALDA DE CIMENTO

Houlsby (1990) preconiza que a injeção se inicie por uma calda que seja o mais espessa possível mas que ainda tenha capacidade de penetração adequada para tratar as descontinuidades mais finas. Não é aceitável a utilização de uma calda espessa que causa imediatamente coágulos que interrompem a penetração. Por outro lado a utilização de caldas demasiado finas tem como consequência uma quebra na qualidade final da cortina.

Então na escolha da mistura inicial o fator a ter em conta são as descontinuidades mais fechadas. A prospeção ao maciço de fundação ganha clara importância nesta fase, pois esta deve fornecer informação suficiente sobre a abertura das fendas para se fazer uma correta avaliação da calda a utilizar nas injeções. Para auxiliar esta escolha é notável também a influência dos ensaios de permeabilidade, realizados no furo antes de se proceder às injeções bem como a experiência colhida de furos tratados anteriormente.

Segundo Houlsby (1990), é recomendada a presença de operadores com experiência. Caso não seja possível identifica a utilização de um rácio $A/C = 2/1$ (traço em volume) como o traço geralmente mais aceitável. No entanto, se existirem motivos óbvios para utilizar outra relação, como por exemplo se as fendas forem relativamente fechadas, deve-se utilizar $A/C = 3/1$, ou então o caso em que as mesmas são relativamente abertas, onde se aplica uma calda com $A/C = 1/1$.

Segundo Houlsby (1990), não é necessária a utilização de qualquer outro rácio A/C (traço em volume) de calda de cimento além dos seguintes:

$$5/1 - 4/1 - 3/1 - 2/1 - 1/1 - 0.8/1 - 0.6/1 - 0.5/1$$

A utilização destas misturas garante incrementos de viscosidade adequados e os benefícios da utilização de rácios intermédios é negligenciável face à perturbação que a presença de rácios adicionais implica nos trabalhos.

Houlsby (op. cit.) considera ainda que, no decorrer das injeções, ao espessar as caldas, nunca se deve saltar um dos traços. Caso contrário o engrossamento súbito da calda pode causar fissuração prematura do maciço durante os trabalhos de injeção. E acrescenta ainda que o engrossamento súbito é um dos truques utilizados quando se quer fechar um furo.

Para auxiliar na escolha da calda mais adequada de cada situação, Houlsby (1990) desenvolveu uns princípios de atuação com passos simples que apresenta na Figura 19.

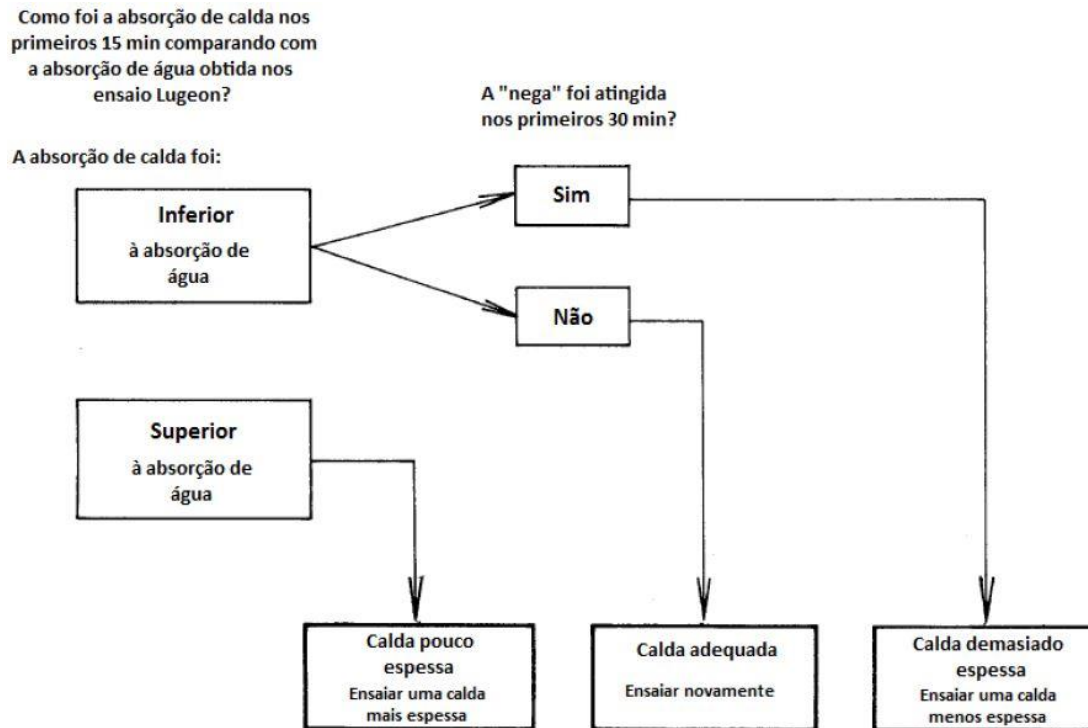


Figura 19 – Esquema para definição dos traços iniciais das caldas (modificado de Houlsby, 1990)

Para que se possa fazer uma avaliação é necessário um número significativo de injeções (pelo menos 6) para que os resultados sejam adequados. Este esquema foi desenvolvido principalmente para os casos mais comuns onde a permeabilidade se situa entre 5 e 30 unidades de Lugeon, mas ainda assim pode ser aplicada fora deste intervalo com as devidas ponderações. Para a realização destas verificações não deve ser feito um espessamento da mistura antes dos 30 minutos e a medição da absorção de água deve ser nas mesmas unidades de volume da absorção de calda. O ensaio de absorção da água deve durar 15 minutos sob uma pressão de 1 bar.

A utilização de misturas mais espessas do que o normal pode ser necessária para lidar com eventuais fugas para a superfície, o mesmo acontece para misturas menos espessas nas injeções em maciços secos (acima do nível freático), nos quais é espectável uma perda significativa de água por absorção.

4.1.2.2. PRESSÕES DE INJEÇÃO

Segundo Houlsby (1990), o objetivo nas injeções é aplicar pressão “*as much as possible*” para que a penetração seja maximizada. Mas há exceções e uma certa variação neste ponto, algumas fundações podem estar sujeitas a pressões mais elevadas do que outras, ao mesmo tempo há casos que mesmo em pressões baixas existe uma sensibilidade considerável. A Figura 20 mostra os valores de pressão aconselhados para diferentes condições do maciço de fundação e

profundidades, admitindo que os trabalhos decorrem sem incidentes pois nesse caso as pressões têm de ser muito inferiores.

A recomendação deste autor, para maciços de qualidade fraca a média, é a que nunca seja ultrapassada a pressão máxima de 1 MPa (150 PSI). Apesar de ainda não haver consenso nesta matéria, esta sugestão é baseada na sua experiencia considerável de que não existe necessidade de ultrapassar este valor para se obter um tratamento de qualidade. Apenas em casos especiais como no tratamento de cavidades, onde pressões muito superiores podem ser utilizadas dada a necessidade de causar fracturação do maciço.

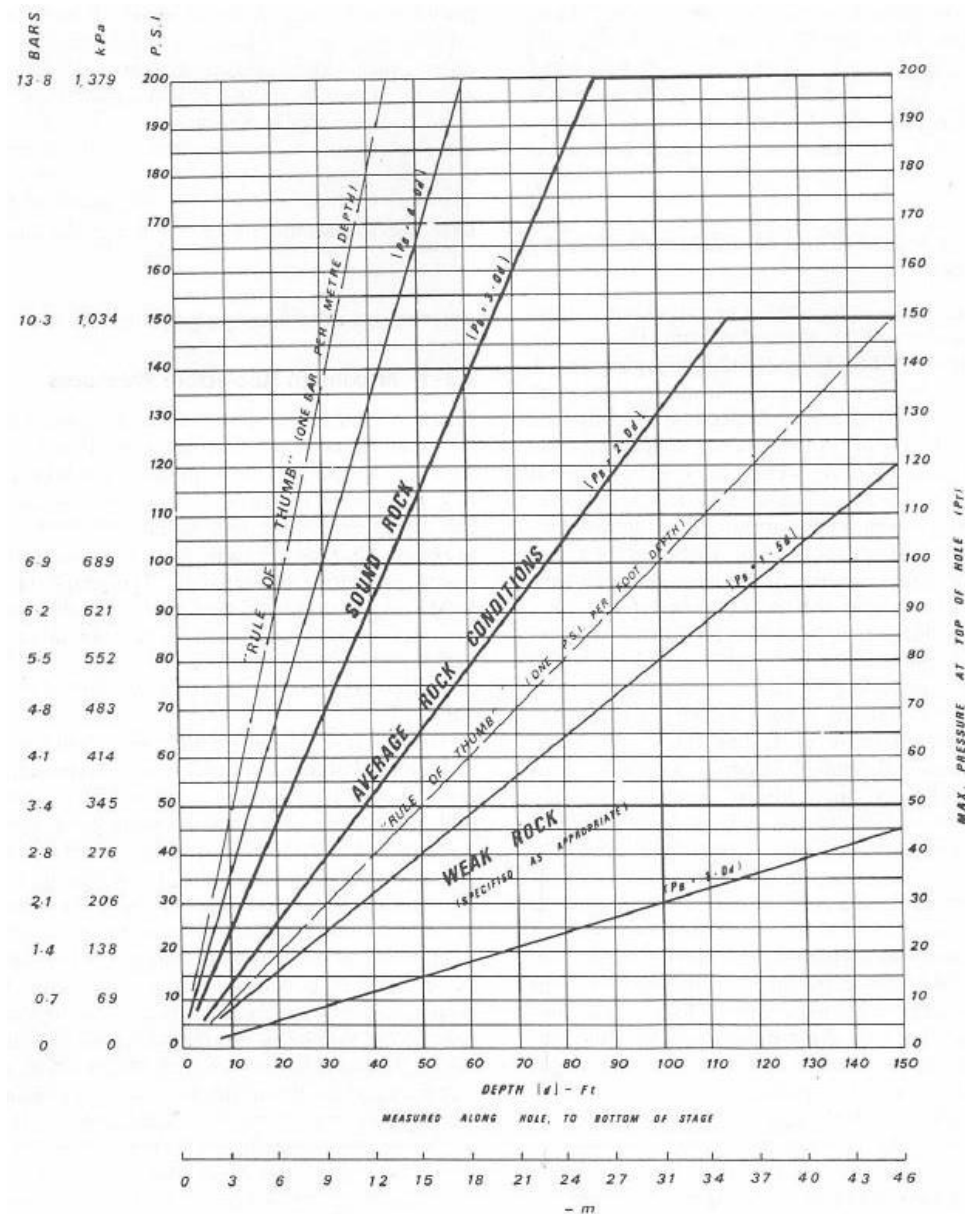


Figura 20 – Pressões de injeção admissíveis para diferentes tipos de rochas (adaptado de Houlby, 1990)

4.1.2.3. INSPEÇÕES PENETRANTES VS MOBILIZANTES

Este assunto gera opiniões diferentes entre especialistas da matéria e pode ser resumido a uma questão. Devem ter as pressões uma magnitude tal que o maciço de fundação sofra movimentos?

Por um lado existe quem defende a utilização de pressões moderadas (injeções penetrantes), que não alteram a fundação. Em oposição há os que preferem uma abordagem mais intrusiva utilizando pressões elevadas (injeções mobilizantes), que provocam movimentos da rocha pela abertura das descontinuidades com o objetivo de facilitar a penetração da mistura, é induzida fraturação hidráulica que em alguns casos se estende, para além da fraturação vertical comum, à situação em que ocorre fraturação horizontal com a possibilidade de levantamento.

Na Figura 20 estão exemplificadas, a tracejado, as duas ideologias com a legenda de “rule of thumb”, a penetrante é uma reta com uma relação de 1 pé para 1 psi (1 m para 22,6 kPa), enquanto a mobilizante tem uma relação de 1 m para 100 kPa. Como se pode observar o declive das duas retas é muito diferentes e naturalmente produzem resultados distintos.

Um exemplo de tratamento num trecho com a profundidade de 10 m, pela primeira regra resultaria uma pressão máxima de 226 kPa, enquanto que na segunda daria um máximo de 1 MPa. Isto é, um critério aplica pressões cerca de 4,5 vezes superior ao outro, apesar desta disparidade de conceitos, ambas são de utilização generalizada.

Houlsby (1990), comparando as duas abordagens, refere que utilizando pressões moderadas, podem ser necessário realizarem-se três furos para tratar um conjunto de fraturas, mas nesse maciço com tratamento não resulta obrigatoriamente uma perturbação dos preenchimentos. Nas mesmas condições, utilizando pressões elevadas, é possível realizar o tratamento realizando apenas um furo, mas o preenchimento é remexido; isto pode ser tolerado mas apenas se os vazios forem completamente preenchidos pela mistura, caso contrário o tratamento deixa a fundação em pior estado do que estava inicialmente.

Houlsby (1990), critica as injeções mobilizantes afirmando que estas tornam a situação pior ao tentar melhorá-la. Segundo este autor, a aplicação de pressões elevadas pode ter vantagens por facilitar a execução do tratamento, particularmente nos casos em que as descontinuidades são muito fechadas, mas a tendência desse procedimento é a de haver uma menor quantidade de furação em profundidade. Isto cria incertezas, que só são resolvidas recorrendo a nova furação, daí pode resultar na necessidade de se realizar tanta furação num como no outro, caindo a suposição inicial da vantagem económica.

4.1.2.4. EXECUÇÃO DAS INJEÇÕES

Para a escolha do faseamento dos trabalhos de injeção, dos três apresentados anteriormente que foram analisados por Houlsby, o descendente sem obturador foi o que o autor sempre mostrou especial apreço. Este autor baseia a sua escolha no facto de considerar que este tem maior

flexibilidade e potencialidade que os demais, ainda que sacrificando de certo modo o lado económico do tratamento.

Quanto às injeções em si, como anteriormente foi dito, Houlsby (1990) recomenda que se comecem as injeções com uma pressão relativamente baixa (por exemplo 1 bar), durante alguns minutos. Possibilitando desta forma que decorra o tempo necessário para verificar e atuar adequadamente quando se verifica a existência de um qualquer eventual problema.

Durante as injeções deve existir uma verificação regular do volume de calda absorvido pelo maciço (Figura 21) e comparar esses valores com os resultados dos ensaios de Lugeon realizados anteriormente. Esta comparação permite verificar se os volumes absorvidos são comparáveis com os obtidos nos ensaios de absorção de água. Em caso de absorção demasiado alta deve fazer-se um espessamento da mistura e, na situação contrária, de baixa absorção, muito provavelmente a mistura é demasiado espessa.

Por fim, quando se atinge a nega, a pressão deve ser mantida durante 15 minutos adicionais. Este intervalo de espera permite que, até certo ponto, a calda estabilize nas fraturas e garanta um certo enrijecimento tixotrópico, bem como um pouco de presa do cimento, permitindo que o maciço tratado tenha já uma capacidade mínima para resistir às ações de arrastamento provocadas pela água no subsolo e pelas injeções vizinhas.

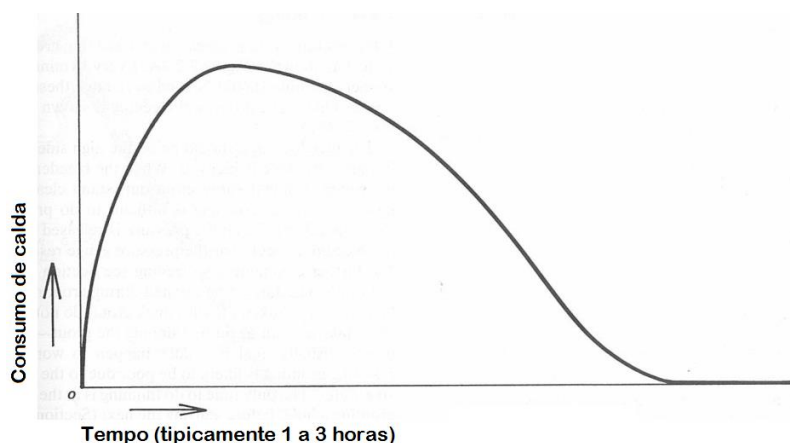


Figura 21 – Evolução típica do consumo de calda com os 15 minutos adicionais depois de atingida a nega (adaptado de Houlsby, 1990)

4.2. MÉTODO DE GIN

Lombardi concebeu o método de GIN (Grouting Intensity Number) em 1993, é um método prático que foi desenvolvido para aplicar sobretudo em misturas de calda que apresentem um certo nível de coesão, ou seja que tenham um comportamento Binghamiano. Este método teve uma aceitação positiva no mundo profissional e já foi adotado em diversos projetos de barragens para a consolidação e para a cortina de impermeabilização.

Segundo o autor, um aspeto crítico na aplicação deste método prende-se com a correta escolha do “Grouting Intensity Number”, ou seja, do valor da intensidade de injeção. No entanto o método

de GIN não é apenas um meio para escolher e definir este parâmetro, mas antes um tipo de filosofia para melhorar a capacidade de um maciço e reduzir a sua deformabilidade e permeabilidade.

O conceito com que esta metodologia foi desenvolvida tem como alvo não só os melhores resultados imediatamente depois dos processos de injeção, mas durante todo o tempo de vida da obra. Evitando simultaneamente danos no maciço rochoso da maneira mais económica e simples possível.

4.2.1. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS

Segundo Lombardi (1996) num documento publicado no “The International Journal on Hydropower & Dams” estes são os princípios fundamentais para a aplicação do método de GIN:

- Determinar com o máximo de precisão possível as características do maciço rochoso, para que o tratamento seja pensado e adaptado para as características presentes no local em vez de se aplicar um tratamento genérico.
- Definir claramente à partida os objetivos a alcançar pelo tratamento para evitar sobredimensionamento ou mesmo utilização de técnicas desadequadas com o pretendido;
- Utilizar sempre uma calda de boa qualidade, isto é, aplicar materiais que proporcionem a permanência dos benefícios do tratamento a longo prazo;
- Adotar uma mistura que tenha um rácio A/C que seja estável, pois só este tipo de rácios tem um comportamento previsível e proporcionam melhor qualidade final;
- Utilizar apenas um tipo de calda para todo o processo de injeção, isto simplifica o processo e evita erros no local de trabalho;
- Usar um aditivo super-plastificante que reduz a viscosidade e o ponto de presa da calda, para que a mesma distância de penetração seja atingida com menores pressões;
- Evitar ensaios de absorção de água durante os trabalhos de injeção, pois são desnecessários para o processo e causam custos e atrasos desnecessários. Em vez disso devem ser realizados apenas antes e depois do tratamento para verificar a eficácia deste;
- Realizar sempre a saturação do maciço rochoso que esteja por cima do nível freático, para evitar que a água seja absorvida da calda pela rocha seca. Esta perda de água da calda pode levar a problemas de obturação;
- Adaptar os comprimentos dos trechos de injeção às características do maciço, isto é, à frequência e abertura das descontinuidades ou falhas. Na prática isto traduz-se em trechos maiores em profundidade;
- Registrar continuamente todos os dados das injeções (volume absorvido, pressão, tempo) num computador;
- Por fim, escolher uma curva limite de GIN adequada às características dos maciço rochoso e à intensidade de tratamento requerida.

4.2.2. ESCOLHA DA MISTURA

A escolha entre a utilização de uma calda espessa ou fina tem vindo a gerar controvérsia durante muito tempo, e é espectável que ainda dure bastante mais. No entanto, desde 1985 diversos autores têm vindo a expressar preferência, nas suas publicações, por misturas mais espessas.

A prática da utilização de 1% a 2% de bentonite na mistura, com o objetivo de aumentar a estabilidade e reduzir a sedimentação está progressivamente a ser substituída pela injeção de caldas com uma maior percentagem de cimento aliadas a um aditivo super-plastificante. Este tipo de misturas tem ganho apoio porque são estáveis, têm menor coesão, atingem penetrações superiores e ainda adquirem resistências superiores depois de serem colocadas. Estas características, das caldas mais ricas em cimento, resultam em diferentes aspetos que são exibidos tanto durante o processo de injeção como ao longo da vida útil do tratamento da fundação.

- Menor quantidade de água segregada da mistura a ser removida;
- A estabilidade da calda é superior e o seu comportamento é previsível por ser um fluido Binghamiano;
- Existe um menor risco de hidro-fraturação e levantamento de blocos, por perder rapidamente a pressão (resultado da coesão e tixotropia);
- Tem menor perda de volume durante a hidratação, e por isso, resulta uma melhor ligação ao longo das paredes das descontinuidades;
- Tanto a densidade como a resistência mecânica são superiores por ter uma maior quantidade de cimento, aumentando a resistência à erosão e a fenómenos de canalização;
- A porosidade e a permeabilidade são inferiores e as ligações entre partículas mais fortes, resultando então numa maior resistência química e um maior tempo de vida do tratamento.

As caldas estáveis, por causa da coesão, requerem uma pressão de injeção mais elevada para atingir o mesmo comprimento de penetração do que as misturas mais finas. No entanto, através da adição de uma pequena quantidade de super-plastificante, tanto a coesão como a viscosidade podem ser consideravelmente reduzidas.

No caso de se estar a tratar um maciço em condições secas, por se situar numa cota superior ao nível de água, deve haver um cuidado especial no seu desenvolvimento. Nestes casos, a injeção de caldas relativamente espessas aliadas à perda de água podem levar a entupimentos, pondo em causa a qualidade e efetividade dos trabalhos realizados. É então prudente, a realização de injeções de água durante algum tempo, para que se atinja uma saturação parcial no maciço rochoso imediatamente antes das injeções de calda.

No tratamento de rochas com fraturas bastante fechadas, é importante realçar que a penetração da calda depende mais do tamanho das partículas do cimento do que a diluição da mistura. Por isso, o autor recomenda que em vez de se tentar aumentar a penetração pela adição de água, deve-se utilizar cimento mais fino com adição de um super-plastificante, aliado a maiores pressões de injeção.

A escolha da calda de cimento, deve ser realizada recorrendo a ensaios de laboratório e a ensaios de injetabilidade. Uma vez encontrada a mistura, com as suas propriedades mecânicas dentro dos limites desejáveis, esta deve ser utilizada em todos os tratamentos de injeção, pois isto simplifica muito o procedimento de injeção.

4.2.3. O PARÂMETRO DE GIN

O número da intensidade de injeção, ou GIN, está definido como o produto da pressão final pelo volume final de calda absorvida por metro de cada trecho.

$$GIN = P_f \cdot V_f \quad (3)$$

onde P_f = pressão final

e V_f = volume final de calda absorvida por metro

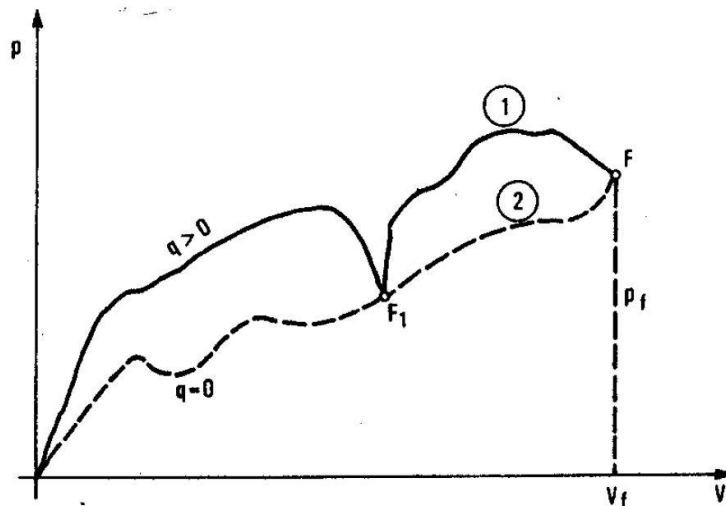


Figura 22 – Exemplo do desenvolvimento da pressão durante a injeção em relação com o volume de calda absorvido (Lombardi, 1996)

A Figura 22 mostra uma evolução típica da relação das pressões de injeção (traço contínuo) e das pressões de repouso (traço interrompido) com o volume de calda injetado. Geralmente a pressão aumenta durante o processo de injeção, mas isso não ocorre de uma forma regular. A pressão na boca do furo é claramente influenciada pelas perdas de carga hidráulica ao longo do furo e ao longo das fendas por onde a calda penetra. Essas perdas são função do caudal, da viscosidade e da coesão da mistura, que tem características binghamianas.

No momento em que o processo é interrompido (ponto F1), caudal nulo, a pressão de repouso é apenas um resultado da coesão da calda e das características do maciço. Então parar o processo corresponde a uma perda de pressão. O conceito de GIN está baseado nesta pressão final de

repouso, pois a pressão durante a injeção está muito influenciada pela intensidade da absorção, que por seu lado depende do operador e pela sua forma de conduzir o processo.

Regra geral, o processo de injeção pode continuar indefinidamente utilizando pressão crescente, e obviamente com crescente volume absorvido. Conclui-se então que o conceito comum de nega não tem qualquer significado físico real. De facto esta noção apenas indica que o escoamento vai cessar a uma dada pressão, isto é o mesmo que dizer que existirá mais absorção de calda se a pressão aumentar. Desse modo pode-se dizer que o processo de injeção pode ser interrompido a qualquer momento, isso significa que isso pode ser feito em qualquer nível de pressão, independentemente do GIN escolhido.

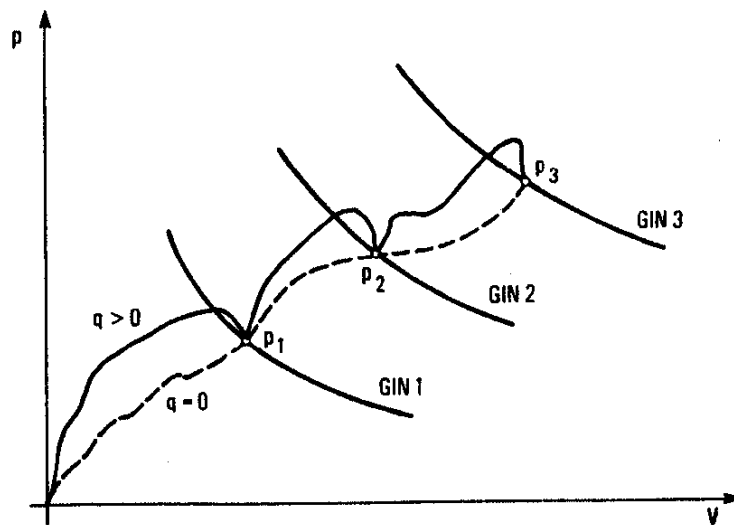


Figura 23 – Exemplo de múltiplas interrupções num processo de injeção (Lombardi, 1996)

Como GIN é o produto da absorção pela pressão final, é também uma aproximação muito aceitável do valor da energia aplicada no maciço de fundação, no entanto a energia dissipada durante o processo de injeção em si pode ser desprezada.

Então a aplicação de um limite no parâmetro GIN é efetivamente limitar a energia que se vai introduzir no maciço rochoso, limitando então o risco de danificar a rocha.

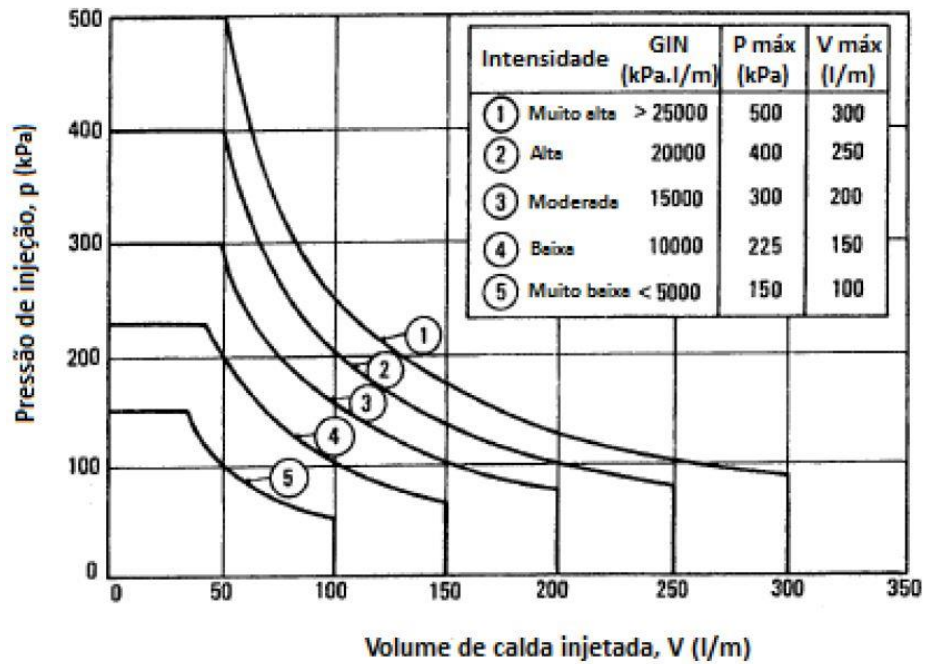


Figura 24 – Conjunto de curvas GIN padrão (adaptado de Lombardi, 1996)

No entanto o conceito de GIN tem outro significado. Em repouso, a pressão (p) é uma função da coesão (c) da mistura, da distância (R) atingida pela calda e ainda a abertura equivalente (e) das descontinuidades, então:

$$p = \frac{R \cdot c}{e} \quad (4)$$

$$V = R^2 \cdot e \quad (5)$$

$$GIN = p \cdot V \cong R^3 \cdot c \quad (6)$$

Por isso a intensidade já não depende da abertura das descontinuidades, que por sinal era o parâmetro mais difícil de estabelecer corretamente.

Para um dado valor de GIN e para uma calda específica com coesão c , a penetração que esta atinge é aproximadamente a mesma distância a partir do furo independentemente das aberturas das descontinuidades. Este facto é extremamente importante para a definição do tratamento.

Naturalmente para se obter a distância real R em função ao parâmetro GIN , é preciso ter em conta um grande número de fatores:

- Geometria de todas as famílias de descontinuidades;
- A frequência das fraturas, ou RQD;
- A natureza da superfície das fraturas dentro e fora do seu plano;
- Irregularidades das descontinuidades como a rugosidade por exemplo;
- A abertura das fraturas e características do seu possível preenchimento.

Na prática estes fatores podem-se resumir num “fator de injetabilidade media” (K), tendo então:

$$GIN = p.V = \frac{c.R^3}{K^3} \quad (7)$$

Com

$$K = R. \sqrt[3]{\frac{c}{GIN}} \quad (8)$$

Ou

$$R = K. \sqrt[3]{\frac{GIN}{c}} \quad (9)$$

A fórmula (9) mostra que numa dada estrutura rochosa, na qual K (fator de injetabilidade) pode ser considerada constante:

- O alcance da penetração R aumenta com $\sqrt[3]{GIN}$;
- E diminui com $\sqrt[3]{c}$ justificando, por isso, a adição de um super-plastificante na mistura.

Finalmente o parâmetro GIN é também uma aproximação bastante razoável à força que a calda exerce nas paredes das descontinuidades. Naturalmente esta força é função da pressão, mas também da superfície em que atua. Esta superfície pode ser considerada, até certa parte, relacionada com o volume de calda que ainda não enrijeceu (Lombardi, 1985). Facilmente se pode concluir que as forças tendentes a separar as paredes não podem exceder um valor diretamente relacionado com o de GIN .

A este contexto, é necessário prestar atenção ao facto de que quando se aplica calda com comportamento Binghamiano, a pressão diminui bruscamente na superfície interior do furo por causa da coesão da mistura. Por isso o raciocínio comum, que assume uma pressão constante aplicada numa superfície, com extensão indefinida, para simular as forças de expansão nas fraturas ou de levantamento dos blocos, é completamente irrealista.

Esta linha de pensamento, ainda que tentadora pela sua simplicidade, tem claras limitações. Em contraste com a linha de pensamento tradicional, de qualquer tratamento de injeção resultam

deslocamentos no maciço rochoso visto que a penetração é feita à custa da aplicação de pressões. Por isso as descontinuidades têm que abrir, por muito pouco que seja.

Então se a pressão for demasiado alta, as fraturas irão abrir demasiado, uma fração significativa da calda vai ser consumida perto do furo, a distância atingida pela penetração será menor e ainda faz com que o consumo de mistura seja maior do que o esperado. Em acréscimo ainda existe a probabilidade de ocorrer expansão e fracturação da rocha por se exceder a sua capacidade. Por isso é importante notar que na metodologia de GIN, não só é definido um máximo para o parâmetro GIN, como também existem máximos para a pressão e absorção da calda.

4.2.4. VANTAGENS DE MANTER O PARÂMETRO DE GIN CONSTANTE

O método de GIN exige que uma vez definida a intensidade de injeção este valor deve ser utilizado tanto em descontinuidades facilmente injetáveis, com grande absorção e baixas pressões, como com as fissuras mais fechadas, com baixa absorção mas pressões consideravelmente superiores. E daí resulta a constância do parâmetro de GIN.

Ao utilizar um valor constante da intensidade de injeção durante todo o processo de tratamento, resulta um alcance igual em todos os furos, isso limita o volume nas fissuras abertas, mas permitindo que as pressões aumentem em zonas em que as fissuras são fechadas e difíceis de injetar. A combinação de pressões altas com absorções elevadas é eliminada, e com ela o risco de levantamento de blocos rochosos ou abertura das descontinuidades. Ao mesmo tempo, é eliminado o caso em que simultaneamente existem pressões baixas e volume absorvido baixo, caso que iria tratar inadequadamente fissuras fechadas.

4.2.5. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MÉTODO DE GIN

Pela análise das equações do método, é lógico que para uma escolha acertada do parâmetro GIN seria necessário o conhecimento da injetabilidade (K). Também é clara a necessidade de definir valores de GIN para cada zona do projeto com condições homogêneas, dependendo do K e dos objetivos de cada zona.

Lombardi desenvolveu três vias para definir K.

A primeira pode ser a partir de um método matemático, começando pela descrição das famílias de descontinuidades (com a precisão possível), e correr simulações a partir desses dados. Naturalmente a capacidade de cálculo limita muito esta solução e por isso só se pode simular configurações teóricas mais simples, e então só têm utilidade como base para os outros métodos.

A segunda possibilidade para obter a injetabilidade é através do método experimental. Que consiste na realização de um ensaio de campo, no qual se mede a distancia atingida pela penetração da calda para diferentes valores de GIN em cada uma das zonas.

A medição deve ser feita através de várias furações realizadas a diferentes distâncias do furo no qual se faz a injeção. De forma a facilitar a observação, podem-se utilizar misturas com corantes diferentes para permitir uma melhor distinção das diferentes fazes de injeção.

Então com os valores de R medidos com suficiente precisão podemos utilizar a equação (10):

$$K = R_t \cdot \sqrt[3]{\frac{c_t}{GIN_t}} \quad (10)$$

onde o sufixo t significa teste; então,

$$GIN = \frac{c \cdot R^3}{K^3} = \frac{c \cdot R^3}{c_t R_t^3} GIN_t \quad (11)$$

Da equação (11) podemos retirar o valor de GIN em função dos resultados do teste e em função a R e c, que representam a distância de penetração pretendida e a coesão da mistura respetivamente.

Por fim a terceira e última possibilidade é a observacional. Nesta via é adotado um valor GIN inicial, obtido a partir de casos anteriores ou a partir da experiência, este valor pode ser ajustado durante o processo de tratamento em função dos resultados obtidos.

Um exemplo desta forma iterativa de atuar é o método de split-spacing falado anteriormente. Começa-se com um certo valor de GIN na furação primária, e à medida em que se avança para as séries seguintes (secundária, terciária, etc.) a absorção reduz gradualmente, concomitantemente a pressão aumenta progressivamente até que finalmente atinge a pressão máxima escolhida.

Este aumento de pressão de uma serie de injeções para a seguinte é um indicador de que a anterior selou as fissuras mais abertas e que a próxima série está a atuar nas menos abertas.

A taxa de redução da absorção de uma série para a seguinte pode ser usada como um critério razoável para conduzir a operação. Na prática mostrou que a utilização de uma taxa de redução para metade pode ser considerado um excelente resultado. Como é natural taxas pontuais de 25% e 75% são comuns e devem ser aceites.

Se a taxa observada for demasiado baixa, isto significa que o valor de GIN utilizado era demasiado baixo para o espaçamento entre furos escolhido. Neste caso a solução passa por aumentar o valor de GIN ou a redução do espaçamento da furação.

O oposto deve ser feito se a taxa for desnecessariamente elevada.

No entanto deve ser tido em conta que o procedimento é em qualquer dos casos bastante auto-regulador.

Regra geral, o problema consiste na relação entre o custo da calda em si com o custo da furação, para então se atingir a combinação mais económica possível.

Dessa forma, não se pode ignorar o facto de que em qualquer altura (ou seja em qualquer pressão), as fendas mais abertas vão estar sujeitas a uma penetração mais extensa do que as mais fechadas. E então uma cortina suficientemente fechada pode ser alcançada apenas se um número mínimo de séries de furação é realizado por alinhamento. Consequentemente a pressão de injeção vai aumentar de série para série.

Por razões económicas, os furos da ultima série são furados apenas até à profundidade na qual a absorção em séries adjacentes excedeu um certo limite, este limite pode ser definido como:

$$V_{lim} = 0,5 \cdot \frac{GIN}{P_{max}} \quad (12)$$

Por razões práticas, a pressão de injeção tem de ser limitada. A definição da pressão máxima é como princípio, independente da escolha do valor de GIN, e tem de ser definida em função dos objetivos do projeto.

Por exemplo no caso de uma cortina de impermeabilização, é muito comum a utilização de pressões que são duas a três vezes a pressão de água que esse ponto estará sujeito durante o funcionamento. Desta forma, a possibilidade de no futuro ocorrer a abertura das fraturas pela ação da água, pode ser impedida numa extensão considerável de casos.

O máximo de absorção também deve ser definida como função das condições locais, tomando em conta por exemplo, o risco de perdas de calda como resultado de vazamentos para a superfície ou para cavidades desconhecidas.

Como resultado destas considerações, percebe-se que diversos valores de GIN podem ser utilizados simultaneamente em diferentes locais da mesma obra, mesmo que apenas um tipo de mistura seja aplicado.

5

CASO DE ESTUDO – TRATAMENTO DE FUNDAÇÕES DA BARRAGEM DO ESCALÃO PRINCIPAL DO BAIXO SABOR

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM DO ESCALÃO PRINCIPAL DO BAIXO SABOR

A barragem do Escalão Principal do Baixo Sabor é uma estrutura em betão constituída por abóbada com dupla curvatura, com uma altura máxima de 123 m, um volume total de betão de 670000 m^3 . O coroamento está situado à cota (236,00), tem um desenvolvimento de 505 m e 6 m de espessura. A barragem insere-se num vale medianamente encaixado, em formações graníticas.

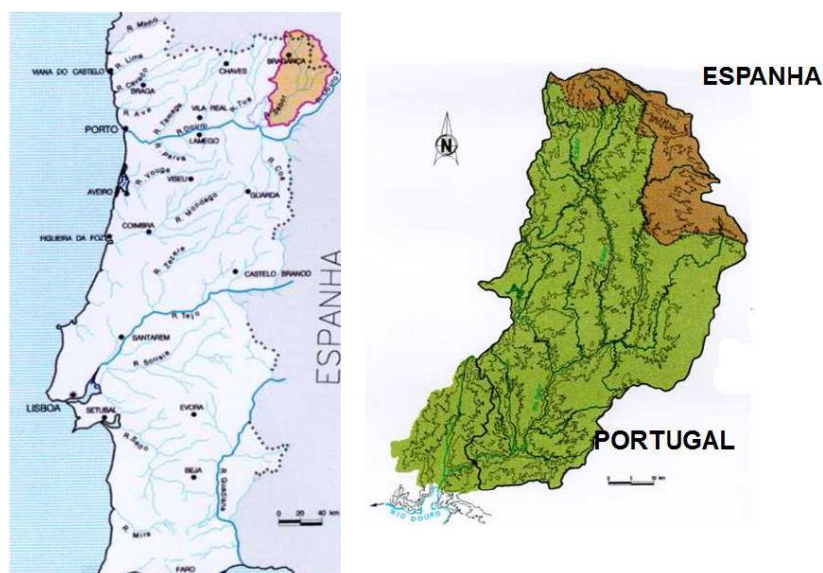


Figura 25 – Bacia Hidrográfica do rio Sabor (Cedido pela EDP)

A barragem encontra-se dividida em blocos através de 32 juntas de contração afastadas de cerca de 15,4 m na margem direita, 15,7 m na margem esquerda e 17 m na zona central. Na zona central do coroamento da barragem insere-se o descarregador de cheias de superfície do tipo lâmina livre, que possui quatro vãos controlados por comportas, com uma capacidade de vazão total de

5000 m³/s, e que restitui os caudais para uma bacia de receção e dissipação de energia, localizada no pé de jusante da barragem (leito do rio).

As juntas são definidas por planos verticais radiais à diretriz do arco de coroamento. Para providenciar o monolitismo da abóbada as juntas serão injetadas com caldas de cimento, para o que foram divididas em compartimentos dotados de dispositivos de injeção, através de lâminas horizontais espaçadas, em altura, de 10 m. Dispõe também lâminas junto aos parâmetros e no atravessamento de galerias e câmaras.

A central hidroelétrica subterrânea localiza-se na margem direita, a jusante da barragem, e alberga dois grupos reversíveis com turbina-bomba, com uma potência de 81 MW cada, alimentados por circuitos hidráulicas independentes.

A albufeira criada pela barragem do escalão principal tem uma capacidade de cerca de 1095 hm³ (capacidade útil de 630 hm³) para o nível de pleno armazenamento (NPA) à cota (234,00), correspondendo a uma área inundada de cerca de 2819 ha, e de cerca de 1124 hm³ para o nível de máxima cheia (NMC) à cota (235,00) sendo a correspondente área inundada igual a cerca de 2860 ha. Na Figura 26 apresenta-se a planta geral do aproveitamento.

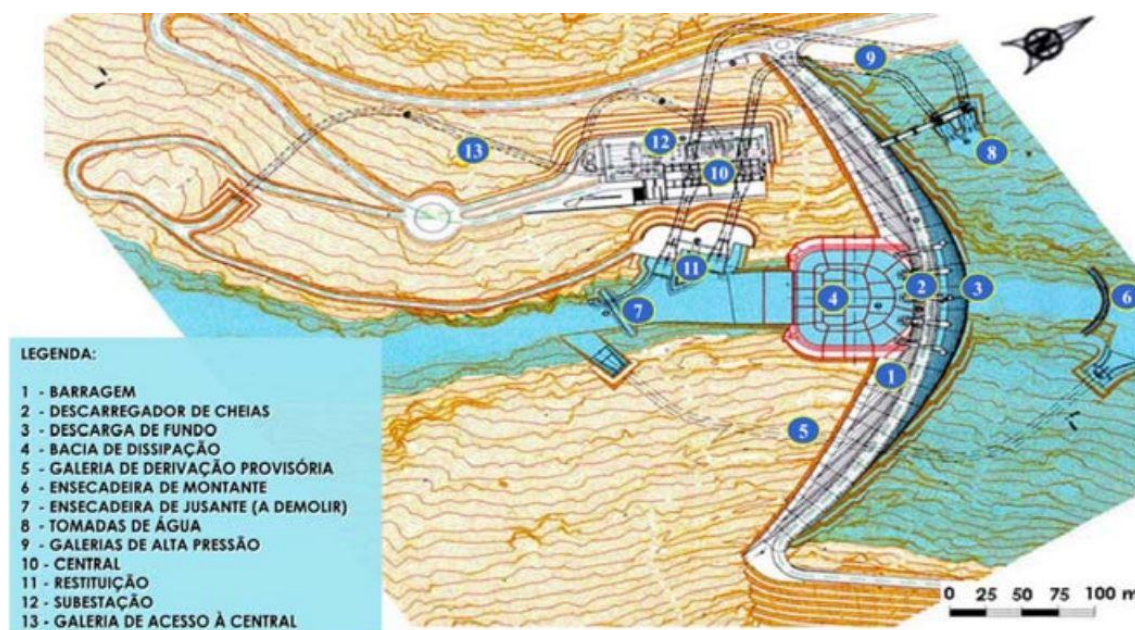


Figura 26 – Planta geral do escalão de montante

A barragem é dotada de seis galerias de visita situadas às cotas (129), (149), (169), (189), (209) e (229) e uma galeria geral de drenagem que acompanha o contacto com a fundação e que na zona central da abobada se divide em duas. A partir das galerias de visita são acessíveis os cinco poços de fios-de-prumo.

A implantação da barragem foi feita no sentido de ser escolhida a secção em que o vale se apresenta mais simétrico e mais encaixado. Assim, no local da barragem o vale é relativamente

simétrico, em forma de V, possuindo a margem direita uma inclinação mais acentuada que a esquerda.

Tendo em consideração as características específicas da barragem e do maciço rochoso de fundação, foi concebido um tratamento desta última em que é possível distinguir as seguintes componentes a que se atribuem fins diferenciados:

- Consolidação do maciço rochoso incluindo a ligação betão-rocha;
- Cortina de estanqueidade da fundação;
- Drenagem;
- Piezometria.

Previram-se também a realização de um conjunto de furos de controlo nos quais foram realizados diversos ensaios antes e após o tratamento das fundações, com o objetivo de validar alguns dos pressupostos base admitidos para o tratamento e verificar a eficácia dos trabalhos que vierem a ser realizados.

5.2. ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

O estudo da geologia do local teve início com a recolha e análise da informação disponível a qual incluía, essencialmente, fotografia aérea à escala 1:6500, cartas topográficas às escalas 1:25000 e 1:1000 e a carta geológica à escala 1:50000 (Figura 27).

É possível verificar que a natureza dos maciços rochosos é dominada por granitos e xistos (representados pela cor vermelha e verde respetivamente). O local de implantação da barragem do Escalão de Montante é constituído essencialmente por um maciço granítico de duas micas, de grão médio a grosseiro e tendência porfiróide.

Como se pode verificar, existe um grande acidente geológico denominado “falha da Vilariça”, representado com uma cor acinzentada. Ao longo desta, constata-se que houve movimento relativo bastante acentuado, notando-se que a formação granítica à esquerda e à direita da falha em questão, encaixam-se, bastando para isso deslocar a zona da esquerda em movimento ascendente e a zona da direita em movimento descendente. Apesar de se tratar de uma falha ativa, o local de implantação da barragem do Escalão de Montante insere-se numa região de sismicidade moderada a baixa (Mendes, 1971 em Gonçalves, 2011).

A representação de falhas e de falhas prováveis, pela importância que têm no comportamento dos maciços rochosos, constitui informação muito útil para a execução de um projeto de barragens.

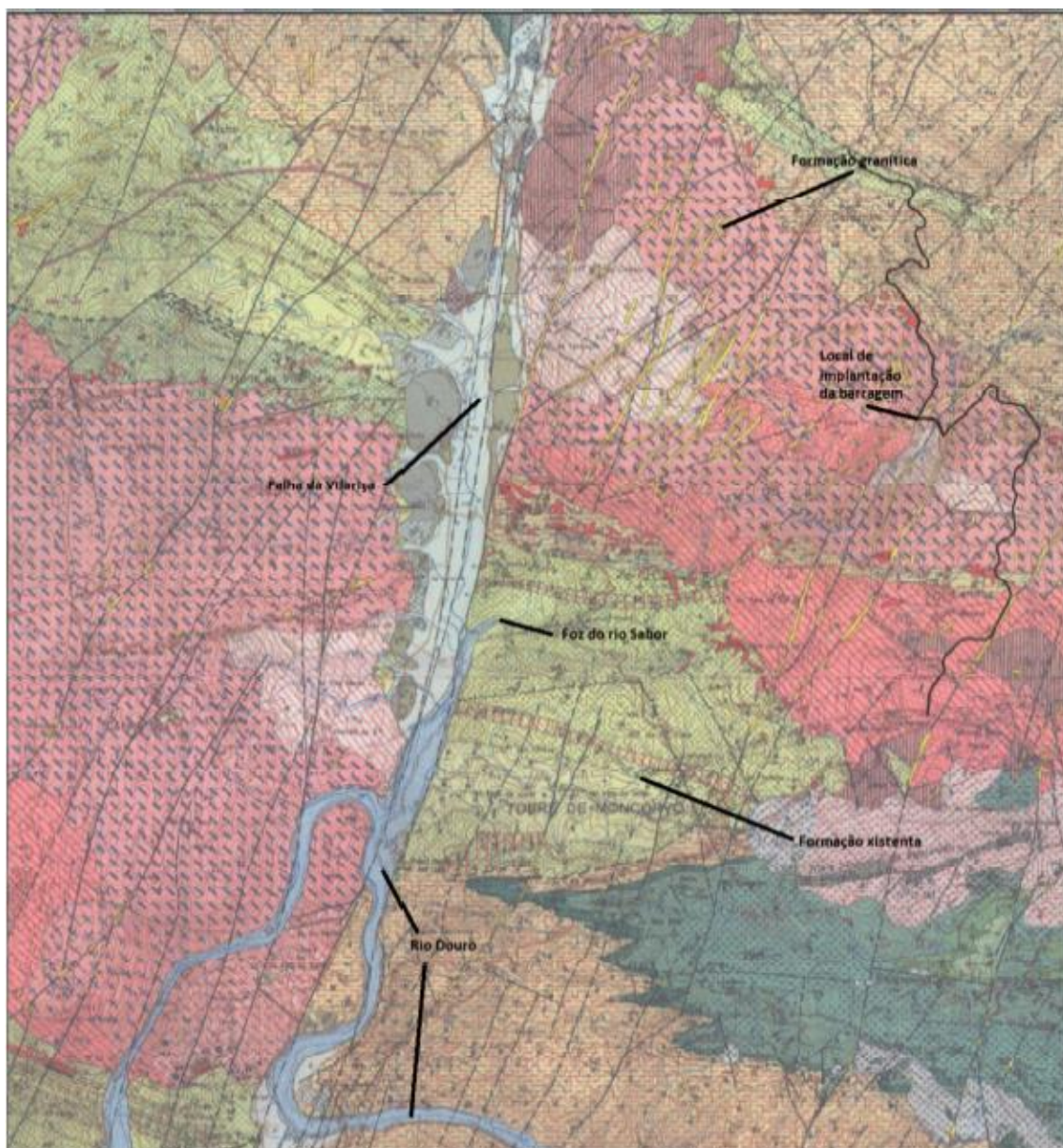


Figura 27 – Extrato da folha 11-C da carta geológica de Portugal (Serviços Geológicos de Portugal (1989) – Carta Geológica de Portugal; Folha 11-C (Torre de Moncorvo). (Ferreira da Silva, Almeida Ribeiro e Ribeiro, 1989) (Cedido pela EDP) (adaptado por Gonçalves, 2011)

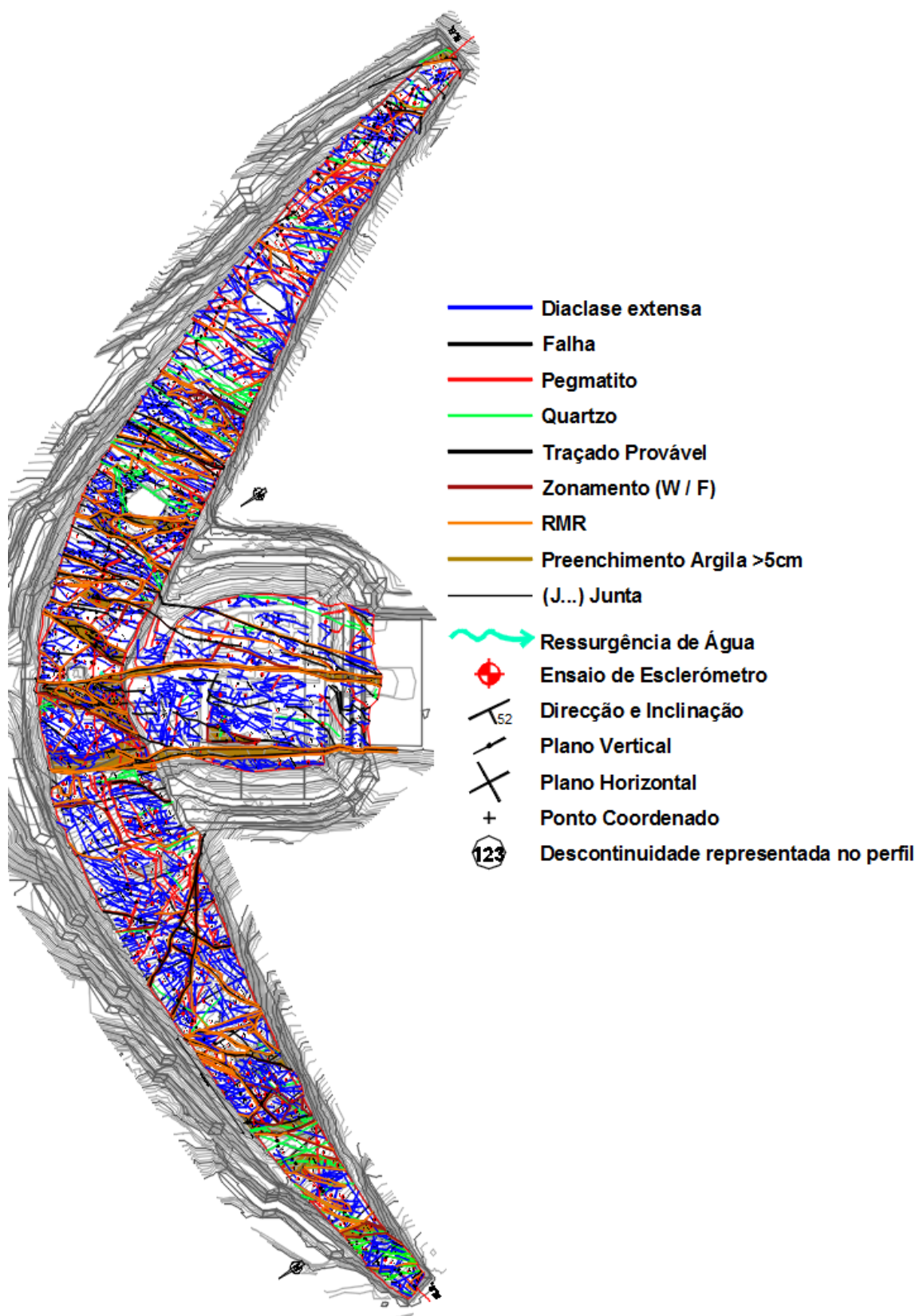


Figura 28 – Planta estrutural da caracterização geológico-geotécnica realizado no maciço rochoso de fundação após escavações

5.3. DEFINIÇÃO DO TRATAMENTO DE CONSOLIDAÇÃO

Os trabalhos de consolidação realizados no escalão principal subdividiram-se na consolidação generalizada, na consolidação localizada de falhas e na ligação betão-rocha.

5.3.1. CONSOLIDAÇÃO ESPECÍFICA NAS FALHAS A, B E C

O reconhecimento geológico-geotécnico e caracterização geotécnica realizados após as escavações para a barragem, vieram confirmar a necessidade de um tratamento específico das falhas A, B e C, situadas na fundação do bloco da barragem delimitado pelas juntas J17 e J18 – falhas A e B e sob o bloco definido pelas juntas J19 e J20 – falha C.

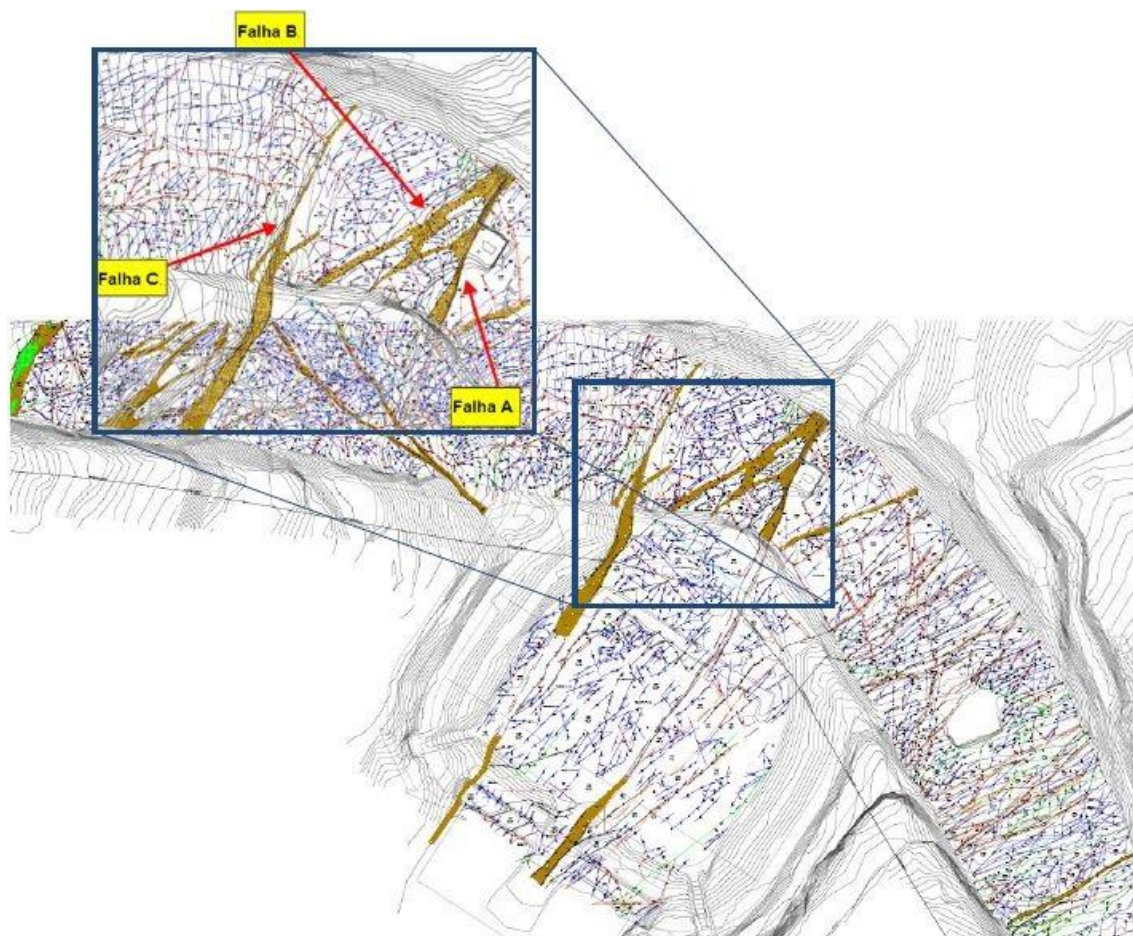


Figura 29 – Cartografia geológico-geotécnica – localização das falhas A,B,C

Estas falhas pelo facto de terem uma orientação pouco enviesada em relação à direção radial da barragem constituem um caminho privilegiado para a circulação de água no sentido montante jusante.

Para o tratamento destas situações considerou-se duas fases de trabalhos. A primeira foi realizada a partir da superfície de contacto betão rocha e consistiu na realização de recravas de betão, após conveniente escavação do material de piores características e limpeza das superfícies escavadas.

A segunda fase consistiu na realização de furos, segundo um alinhamento com atitude próxima da orientação do plano médio das entidades geológicas em causa, a partir dos quais através de jatos de água e ar comprimido, se procurou a remoção do material de mais fracas características geotécnicas.

Especialmente concebida para o tratamento da falha C, foi projetada uma galeria no betão do bloco delimitado pelas juntas J19 e J20, ligando as galerias de fundação cuja diretriz acompanha o desenvolvimento da entidade FY. Na soleira daquela galeria, com a orientação dos furos projetados para a realização do tratamento foram deixados os contramoldes para o atravessamento da recrava de betão, evitando-se assim a necessidade de corte de armaduras naquela zona aquando da abertura dos furos – furação representada a vermelho na Figura 30.

Em relação ao tratamento das falhas A e B foram utilizadas as galerias previamente existentes no projeto, para execução de furos de tratamento, com orientação próxima da orientação do plano médio da falha e com afastamento de 1 m entre si, tal como o preconizado para o tratamento da falha C.

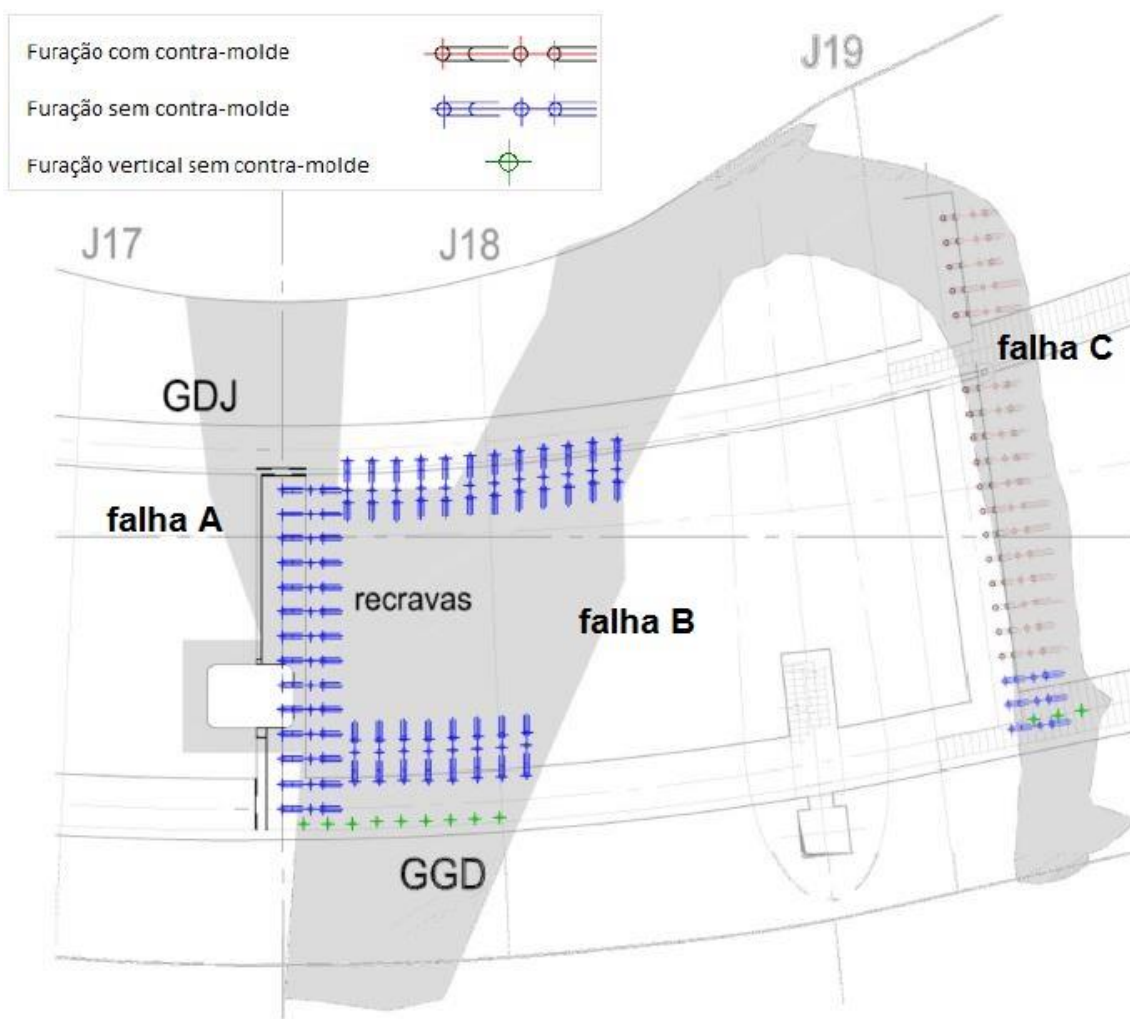


Figura 30 – Esquema em planta da furação para tratamento das falhas A,B e C

A execução deste tratamento foi feita gradualmente no sentido descendente, isto é, após a remoção do material de recheio das falhas em cada troço de dois metros de comprimento máximo, procedeu-se a uma injeção dos furos.

Esta injeção foi feita com argamassa, no caso de a quantidade de material expelido ser considerável, ou com caldas grossas de cimento, nas situações em que se verificou ser pequena a quantidade de material retirado ou não fosse eficiente o preenchimento com argamassa.

O tratamento de substituição processou-se associando um conjunto significativo de troços de furos com idêntica profundidade, considerando-se razoável a divisão do tratamento em cinco zonas com desenvolvimento horizontal equivalente.

O tratamento iniciou-se pela zona situada na parte central do bloco da barragem e, após a injeção e presa da calda ou da argamassa injetada correspondente a um troço definido em profundidade, realizou-se a abertura, limpeza e injeção de substituição dos troços à mesma profundidade das restantes zonas, situadas a jusante e montante.

Para ter em atenção e conciliar os aspetos relativos ao comportamento mecânico e ao comportamento hidráulico, a profundidade máxima no maciço de fundação atingida pelo tratamento das entidades geológicas A, B e C foi de 18 metros na zona correspondente aos primeiros oito metros medidos a partir do lado de montante da barragem e de 14 metros na parte restante.

5.3.2. TRATAMENTO GENERALIZADO DE CONSOLIDAÇÃO

O tratamento generalizado de consolidação envolve a abertura, limpeza, lavagem e injeção dos furos, dispostos em leques, constituindo os perfis de tratamento. Tendo em atenção as atitudes das principais descontinuidades, considerou-se adequada, na generalidade, uma definição com perfis de tratamento situados em planos verticais, cujos traços no plano horizontal têm orientação radial, e normal, à superfície de referência da barragem. Esta orientação tem a vantagem de permitir que o tratamento seja realizado sem quebras de continuidade, no sentido transversal ao vale, e de necessitar de menor apoio topográfico para a implantação dos furos de cada perfil. Na zona do fundo do vale, e nas imediações do poço de bombagem, admitiu-se uma furação inclinada para que as estruturas enterradas não fossem afetadas, conseguindo assim uma zona central de remate e sobreposição.

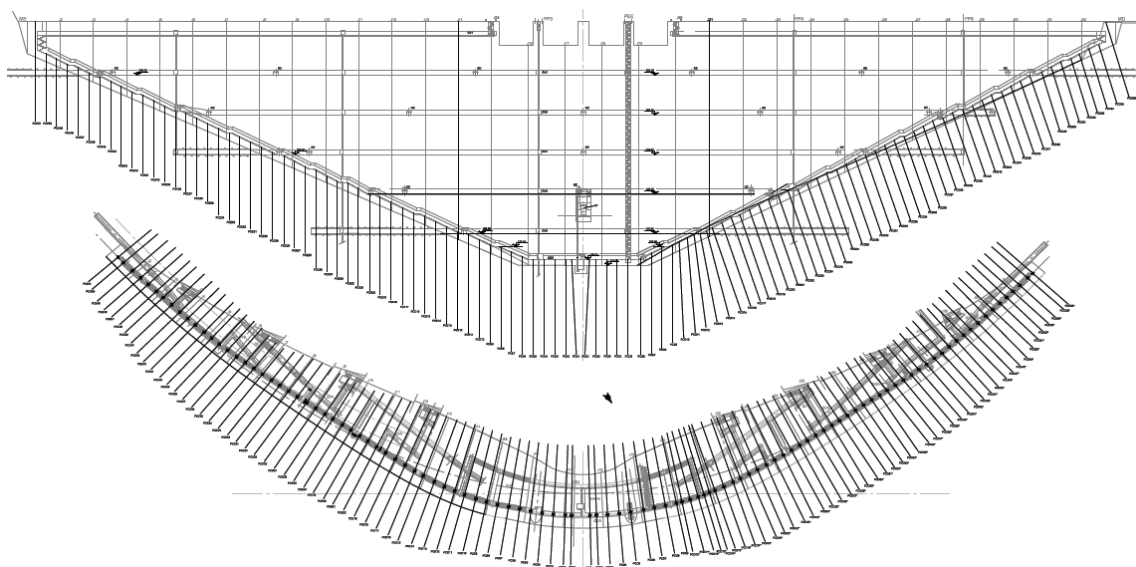


Figura 31 – Representação da furação de consolidação em corte e em planta de corte longitudinal respetivamente

Como critério geral, na definição do volume do maciço rochoso a ser injetado para o tratamento de consolidação, entendeu-se adequado considerar o critério frequentemente utilizado de tratar sistematicamente as zonas do terreno delimitadas pela superfície que constitui a envolvente dos estados de tensão incrementais superiores a determinado valor (referência = 1.0 MPa), sendo esta envolvente definida a partir dos resultados das análises estruturais obtidos para as combinações de ações correspondentes aos cenários correntes.

Também o afastamento dos perfis de tratamento por injeções foi definido tendo em atenção a experiência positiva alcançada em situações similares. Optou-se, por princípio, pela consolidação de três/quatro perfis por cada bloco da barragem, distribuídos ao longo do desenvolvimento desta entre margens. Tal critério conduziu a que o espaçamento médio dos perfis seja na ordem dos 5 m, valor considerado razoável e semelhante ao utilizado noutras barragens.

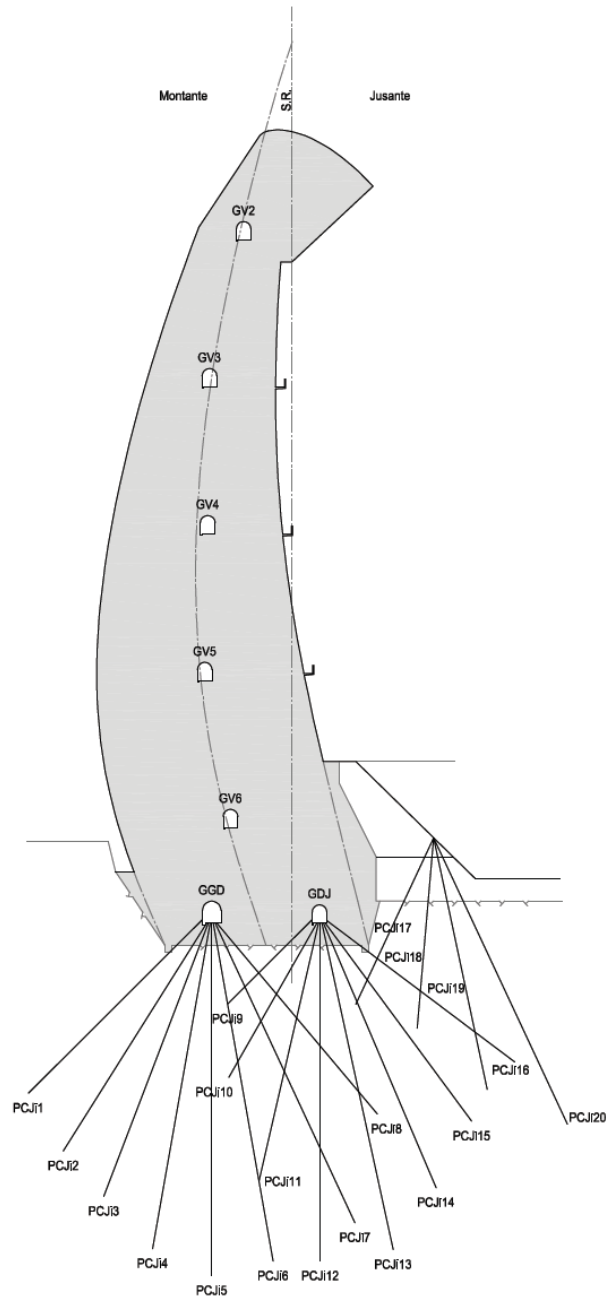


Figura 32 – Pormenor tipo de um perfil fictício do fundo do vale de furação de consolidação

5.3.3. LIGAÇÃO BETÃO-ROCHA NAS GALERIAS DE VISITA

A fim de garantir a ligação betão-rocha nos troços subterrâneos das galerias de visita, foram executadas injeções de colagem nas abóbadas nos troços em rocha das galerias da barragem.

Este trabalho foi realizado antes de qualquer processo do tratamento da fundação da barragem (consolidação) nas suas imediações, de forma a minorar risco de formação de caminhos de percolação preferenciais durante o processo de lavagem entre perfis de consolidação.

Os furos foram abertos à rotopercussão com diâmetro mínimo compatível com o processo de injeção, sem pressão, de caldas de colagem. Estes furos abertos na abóbada prolongam-se 0.5 m em rocha, com uma malha de furos em quincôncio de 2/1 e um afastamento longitudinal de 3 m.

Foi acautelado um prazo mínimo de espera para a presa destas caldas de colagem nas galerias de 1 semana antes da realização dos trabalhos de tratamento da fundação nas proximidades das mesmas.

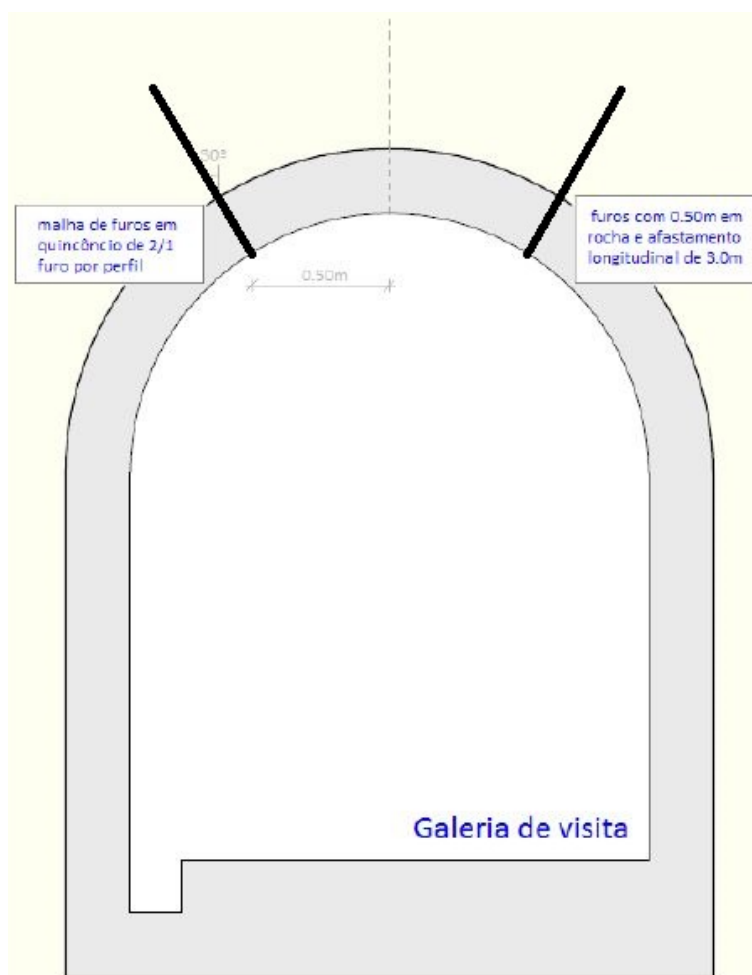


Figura 33 – Pormenor das injeções nas galerias de visita para a ligação betão-rocha

5.3.4. PROCEDIMENTOS

Neste ponto aborda-se um conjunto de procedimentos de carácter geral, relativos aos trabalhos de consolidação, nomeadamente furação, limpeza e injeção dos furos, cuja execução se previu realizar nas fundações após terem sido betonados, ou estarem betonados até cotas mínimas compatíveis com as pressões utilizadas no tratamento, os blocos das estruturas suprajacentes.

5.3.4.1. FURAÇÃO

Em relação ao equipamento de furação verificou-se que de uma forma geral os furos não ultrapassaram o comprimento de 65 metros, pelo que toda furação do tratamento de consolidação, no geral, foi executada utilizando meios roto-percutivos que permitiram elevados rendimentos e uma qualidade que se afigura adequada.

Em face das características das formações e do tipo de operações a realizar durante os trabalhos de lavagem e injeção, foram utilizados “bits” que permitiram diâmetros mínimos de furação não inferiores a 2 ½ polegadas. Admitiu-se também, na realização dos trabalhos, a utilização de equipamentos adequados para o eventual corte de armaduras ou chapas de aço.

5.3.4.2. LIMPEZA

O procedimento de limpeza é o conjunto de operações, a realizar em todos os furos, uma primeira vez na sequência da sua abertura para retirada dos sedimentos provocados pela furação, e, posteriormente às operações de lavagem, uma segunda vez como preparação final do furo antecedendo a fase de injeções. A limpeza foi conduzida pela injeção alternada de água e ar até completa expulsão da própria água utilizada na limpeza do furo.

5.3.4.3. LAVAGEM

A lavagem compreendeu o conjunto de operações envolvendo vários furos destinada a remover materiais que preenchem descontinuidades nas imediações dos furos. A realização da lavagem é uma das questões que normalmente constitui um problema controverso no conjunto de operações que integram um tratamento de fundações.

No caso da barragem do Baixo Sabor Montante, achou-se necessária a sua realização em virtude da presença de algumas descontinuidades preenchidas com material argiloso.

A lavagem foi feita com o objetivo de permitir a substituição do material de preenchimento por cimento, sendo como tal executada de uma forma energética e sistemática entre furos de um mesmo perfil e de perfis contíguos, utilizando uma técnica baseada na injeção alternada de jatos de água e ar segundo regras discriminadas mais à frente.

Perante as características do preenchimento argiloso, reconheceu-se que a utilização de um dispersante na lavagem poderia conduzir a uma maior eficiência do processo, mas tal levantava

também algumas observações que, após pesadas e confrontadas com o acréscimo de benefícios resultantes, levaram à opção da dispensa da sua utilização.

Assinala-se como obstáculo principal, o facto de a sua utilização conduzir à obrigatoriedade de considerar prazos mais dilatados para execução dos trabalhos, que se justificam pela necessidade da existência de um tempo de espera, para permitir que o dispersante possa produzir efeito nos materiais de recheio e, depois por acarretar operações de lavagem mais intensas destinadas, não só a retirar o material desfloculado, mas também para assegurar a eliminação de restos de dispersante cuja atuação após o final da lavagem deixa de ser benéfica.

Indica-se de seguida, em termos gerais, as normas orientadoras do processo de lavagem, estabelecidas pela EDP com base na experiência de tratamentos em condições similares:

- A lavagem do terreno foi conduzida através de furos reunidos em grupo;
- Cada grupo, regra geral, teve 9 furos (3 em cada um de 3 perfis consecutivos) ou 12 furos (4 em cada um de 3 perfis consecutivos);
- As pressões máximas da água utilizadas na lavagem foram, por norma, de valor igual a 80% das fixadas para a injeção, em casos especiais admitiu-se que pudessem ser elevadas até 100%;
- A lavagem foi realizada por troços sucessivos, partindo do fundo de cada furo para a boca, os quais não podiam ultrapassar 6 metros de comprimento, no caso de o comprimento total dos furos não ser um múltiplo deste valor, os acertos foram realizados considerando troços de menor comprimento posicionados mais próximos da boca dos furos;
- Duração mínima de lavagem por cada troço de furo foi ½ hora, só depois de concluído um troço, se desloca o obturador para uma nova posição;
- Em cada troço de furo, a lavagem foi conduzida pelo processo de “jetting”, sendo feita uma sequência de 10 minutos de lavagem a água, seguidos de 5 minutos de lavagem a ar, consequentemente cada furo será lavado pelo menos duas vezes;
- Em cada operação de lavagem de um troço de furo e a partir da última saída de material sólido realizou-se, no mínimo, uma sequência de lavagens com água e ar;
- No caso de um troço de um furo não absorver o processo de “jetting” foi abandonado, e foi substituído por uma lavagem durante o período de ½ hora, se entretanto, o troço comesse a absorver de uma maneira normal (isto é, comunicar com outros furos), passava-se a ser tratado segundo a regra geral;
- No caso de um troço de furo absorver, mas não fosse possível detetar as correspondentes ressurgências por outros furos (designadas por “normais”), ou diretamente através da fundação (“anormais”) não era utilizada a lavagem a ar, sendo o período de tempo correspondente substituído por igual período de lavagem a água;
- Durante a operação de lavagem do troço de um furo foram cuidadosamente anotadas as comunicações para furos do mesmo grupo, bem como os tempos ao fim dos quais elas se

verificaram (esta informação é do maior interesse para o conhecimento das comunicações que poderiam determinar a posterior condução das injeções);

- O aparecimento de ressurgências “anormais” determinava a imediata suspensão da lavagem nesse troço de furo;
- Só depois de concluída a lavagem de todos os troços de um furo se avançava ao furo seguinte;
- Se a operação de lavagem tivesse de ser interrompida por um período inferior a 4 horas, o seu reinício tinha que ser antecedido por uma limpeza suplementar por aplicação sucessiva de dois jatos alternados de água e ar, com uma duração total de 15 minutos;
- No caso de se verificar uma interrupção não programada de duração superior a 4 horas, a retoma era antecédida de uma limpeza suplementar a efetuar em cada um dos furos já tratados do grupo de lavagem;
- Concluída a lavagem do último troço que conclui um grupo de furos foi feita uma lavagem final por injeção à boca e simultânea dos furos pertencentes a um dos três perfis do grupo, depois idêntica operação para os furos pertencentes a outro perfil e, finalmente, ainda de uma maneira semelhante para os furos do último perfil, cada uma destas operações tinha necessariamente uma duração mínima de ½ hora;
- Durante as lavagens foi prevista a recolha cuidadosa do material sólido extraído por lavagem, quer por conveniente colocação de anteparos (para a lavagem a ar), quer por tamisagem das águas de retorno após secagem, o material recolhido será referenciado e guardado para eventuais análises.

Concluída a lavagem dos furos de um grupo procedeu-se à limpeza final dos furos, injetando por cada um destes, a partir da boca, sucessivamente ar (5 minutos) e novamente ar (5 minutos), só então ficando o bloco preparado para receber a injeção do tratamento de consolidação.

5.3.4.4. INJEÇÃO

A injeção em cada furo foi realizada pelo processo ascendente, e foram adotados, como base, troços com o comprimento de 5 metros. Para além das particularidades anteriormente referidas respeitantes à sequência preconizada para a sua execução, importa ainda referir os aspetos gerais relacionados com a composição das caldas de cimento e com as pressões de injeção.

O cimento utilizado para o fabrico de caldas e argamassas de injeção foi do tipo CEM IV/A 32,5 com cinzas volantes siliciosas.

Para além destas propriedades, o cimento teve que satisfazer as seguintes características de finura:

- Finura de Blaine maior que 3800 cm²/g segundo EN 196-6, “Métodos de ensaio de cimentos. Determinação de finura”;
- Finura determinada por peneiração, na malha de 45 µm com uma percentagem de retidos inferior a 10%, segundo procedimento NP EN 196-6, “Métodos de ensaio de cimentos. Determinação de finura”.

Os traços das caldas de cimento foram ensaiados de acordo com os traços indicados na Tabela 7.

Tabela 7 – Tipos de caldas de cimento a ensaiar

Caldas sem adjuvante		Caldas com adjuvante	
Designação	Traço (em peso) a/c	Designação	Traço (em peso) a/c
C1	3 / 1	C4 (A)	1 / 1,5
C2	2 / 1	C5 (A)	1 / 2
C3	1 / 1	C6 (A)	1 / 2,5
C4	1 / 1,5		
C5	1 / 2		

Os ensaios das misturas de caldas de injeção tiveram como objetivo a determinação da sua composição e comportamento quanto a:

- Viscosidade Marsh;
- Exsudação e floculação;
- Densidade;
- Retração da parte sólida durante a maturação;
- Resistência mecânica em compressão aos 28 dias.

Embora para o tipo de cimento indicado não fossem expectáveis valores elevados da variação do volume da pasta no endurecimento, nem valores demasiado baixos para a resistência mecânica aos 28 dias de idade, considerou-se prudente e oportuna a determinação destas propriedades no início dos trabalhos.

Todo o processo de injeção processou-se com recolha centralizada automática e contínua dos dados relativos às pressões e caudais de injeção. O sistema de recolha de dados permitiu o seu processamento informatizado imediato, e fornecer, para além daquelas grandezas, também a imediata representação gráfica da sua evolução temporal, ou da evolução de outras variáveis delas dependentes (por exemplo, o volume acumulado de calda injetada).

No início dos trabalhos de injeção, também se procedeu a um ensaio referente às operações de injeção de calda com o objetivo de se validar, tanto o sistema de recolha automática, como obter informações sobre a metodologia e processos inerentes à injeção.

5.4. CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO

Para a definição da cortina de impermeabilização teve-se em conta tanto a critérios base como a um conjunto de regras que visaram orientar a realização dos trabalhos no sentido de os adaptar às condições reais que viessem a ocorrer durante a sua execução.

Na base da definição da orientação dos furos da cortina de estanqueidade esteve o critério, muito comum em tratamentos deste tipo, que privilegia a minimização dos ângulos entre os furos e as normais às atitudes mais frequentes das famílias de diáclases, tendo na devida conta a representatividade das diferentes famílias. Este critério fundamenta-se no facto de que aquela orientação permitir, com menor comprimento de furação, intersetar um maior número de descontinuidades a serem injetadas.

A aplicação restrita daquele critério não permite alcançar outros objetivos igualmente importantes. Um deles, que no geral conduz à tentativa de materializar cortinas com pendor médio mergulhante para montante, está relacionado, do ponto de vista teórico, com a tentativa de orientar, duma forma mais favorável à estabilidade geral da obra, as forças associadas à inevitável presença de percolação da água no maciço de fundação.

Assim, tendo em consideração as atitudes médias das principais famílias de diáclases, e ainda, conjugando a condição referida no paragrafo anterior com a necessidade de ganhar rapidamente cobertura, adotou-se uma orientação preferencial a dar aos furos da cortina de estanqueidade, a direção que mais intersetasse os planos das famílias de descontinuidades presentes em cada zona.

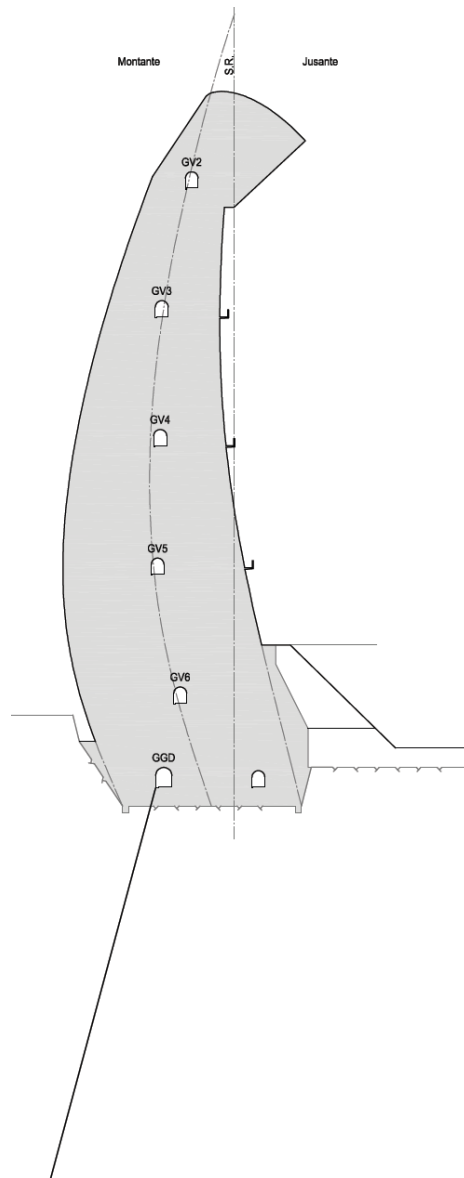


Figura 34 – Pormenor tipo de um perfil fictício de furação de impermeabilização

A cortina de impermeabilização é constituída por uma fiada de furos com 60 a 65 metros de comprimento e com um pendore de 75°. Esta escolha teve como objetivo principal a minimização dos efeitos da circulação de água no maciço de fundação, evitando o desenvolvimento de elevadas subpressões e alteração das condições de estabilidade da zona tratada.

Os furos têm emboquilhamento na galeria geral de drenagem de montante.

Em relação ao comprimento mínimo dos furos da cortina de estanqueidade foram adotados critérios que são frequentemente utilizados na definição da profundidade mínima de cortinas de estanqueidade, nomeadamente o critério que define uma profundidade igual a 50% da carga hidráulica máxima medida junto ao pé de montante da barragem e, simultaneamente, aquelas cuja permeabilidade estimada é superior a 1 unidade Lugeon.

De uma forma geral, para a execução da cortina foi a realização duma furação primária, com furos afastados em cerca de 5 m, o que genericamente, equivale a três furos por bloco, nos quais se realizaram ensaios de absorção de água por troços de 5 m descendentes, à medida do avanço da furação.

Nos casos em que num troço final de algum dos furos primários se registaram absorções superiores ou equivalentes a uma unidade Lugeon, procedeu-se ao prolongamento desse furo por troços sucessivos de 5 m até se verificar uma absorção inferior àquele valor ou uma profundidade limite definida pela fiscalização em função das circunstâncias.

Em regra, foi preconizado que para a abertura dos furos primários da cortina de estanqueidade fosse realizada com recuperação contínua de amostra, recorrendo-se nestas circunstâncias a equipamentos de furação à rotação.

Terminada a abertura de um furo, procedeu-se à respetiva limpeza, que foi conduzida pela injeção alternada de água e ar, até completa expulsão de todo o material sólido, e finalizada pela injeção só de ar para expulsão da própria água utilizada na limpeza do furo.

Logo que concluídos os ensaios de absorção em cada furo, realizou-se uma limpeza final deste, em moldes semelhantes aos já referidos em relação à limpeza final dos furos de consolidação – injeção à boca sucessivamente ar (5 minutos), água (5 minutos) – só então ficando o furo preparado para receber a injeção. Cada furo foi então injetado pelo processo ascendente, por troços de 5 m.

Na sequência da injeção dos furos primários da cortina de estanqueidade, foram abertos furos secundários na vizinhança dos furos primários onde tenham sido registadas absorções superiores ao equivalente a uma unidade Lugeon. Por regra, realizaram-se furos secundários posicionados a meia distância entre aquele furo e os furos primários adjacentes da cortina de estanqueidade (método split-spacing), havendo o cuidado de evitar o atravessamento das juntas da barragem.

O comprimento dos furos secundários foi tal que ultrapassou em 5 metros de profundidade a cota da base do troço do furo primário onde se registou absorção superior ao equivalente a 1 UL. O início da furação secundária nas fundações de um bloco da barragem só ocorreu após o término dos furos primários correspondentes aos blocos vizinhos para não haver perturbação entre uns e outros.

Em semelhança com a furação primária, a abertura dos furos secundários da cortina foi realizada à rotação, com recuperação contínua de amostra, nos quais se fizeram ensaios de absorção de água por troços de 5 metros.

A abertura destes furos foi feita com sondas de elevado rendimento, com diâmetros nunca inferiores a 2 polegadas. Pretendeu-se, com uma recolha de boa qualidade da amostra nesta fase, conjugada com os resultados dos ensaios de permeabilidade e das absorções registadas nas injeções precedentes, o ajuizar da eficácia dos tratamentos realizados e da necessidade de eventuais reforços do tratamento ou da modificação dos modos de procedimento.

Quando, na execução das injeções secundárias, se registaram absorções elevadas, obrigatoriamente se procedeu à realização de furos terciários, com posição intermédia entre os primários e secundários adjacentes. A definição do comprimento dos furos terciários e as condições da sua realização obedeceram aos mesmos critérios utilizados na definição dos furos secundários.

Na eventualidade dos resultados dos ensaios de absorção de água continuarem elevados após a execução dos furos terciários, estavam previstos furos quaternários cuja definição seria analisada caso a caso.

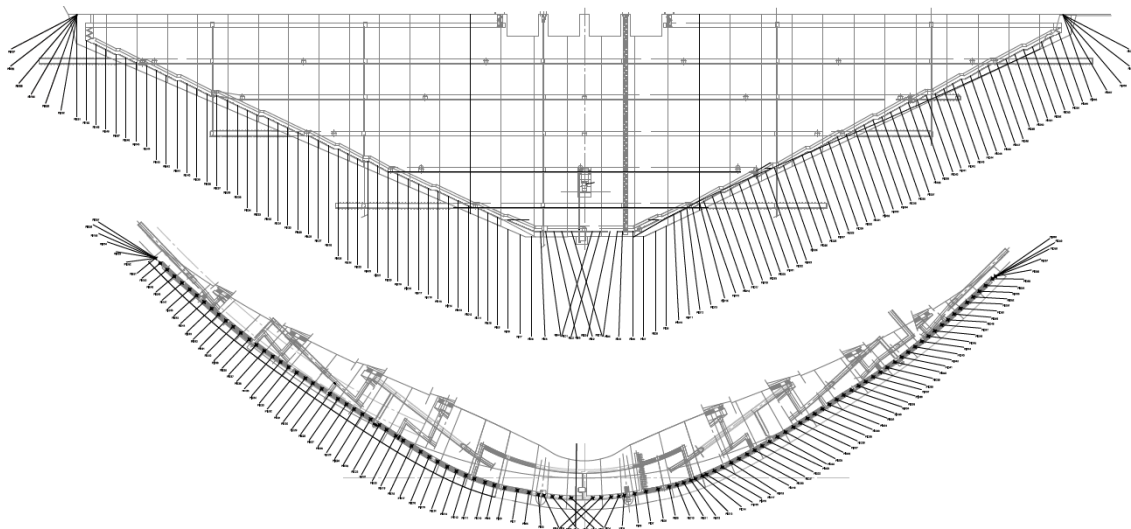


Figura 35 – Representação da furação de impermeabilização em alçado e em planta respetivamente

5.5. PROCEDIMENTOS COMPLEMENTARES

Em relação aos ensaios de absorção, estes foram realizados por troços descendentes à medida do avanço da furação.

Neste projeto considerou-se necessária a realização de ensaios de absorção de água como meio de avaliação e controlo da evolução do tratamento por injeções de cimento. Entendeu-se contudo, que a sua execução ainda que sistemática, pôde ser simplificada, tendo como referencia os ensaios tradicionais do tipo Lugeon. Assim, os ensaios de absorção foram realizados em todos os furos das cortinas de impermeabilização, na sequência da abertura e limpeza inicial, por troços descendentes de 5 metros de comprimento, utilizando obturadores simples. Na execução destes, houve três patamares de pressão estabilizada, cada um com duração mínima de 5 minutos, com recolha centralizada, automática e contínua, e imediato processamento informatizado dos dados relativos às pressões e volumes escoados, a partir dos quais se avaliou a resposta do maciço e se obteve por extrapolação a absorção em unidades Lugeon.

As pressões utilizadas nestes ensaios de absorção foram, por esta ordem, $P/2$ - P - $P/2$, onde P corresponde, à partida, a 80% do valor máximo da pressão de injeção de calda de cimento definida para um troço de furo.

Em relação ao processo injeção das cortinas de estanqueidade, conforme já anteriormente referido, foram realizadas pelo método ascendente, por treços de 5 metros de comprimento. No entanto, quando nos ensaios prévios de absorção de água se verificou algum trecho com absorção nula, este trecho pôde ser associado ao imediatamente superior, passando a ser considerados, para efeitos de injeção, como um só trecho.

5.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Durante as injeções realizadas no âmbito do tratamento de consolidação generalizada foram registadas as absorções de calda de cimento em todos os trechos em volume de calda e em massa de cimento.

A partir da informação das absorções desenvolveu-se um gráfico que representa a massa de cimento absorvida por metro de furo em cada perfil de injeção. Da sua observação e da linha de tendência é perceptível, de certo modo, a variação de características ao longo do desenvolvimento da barragem, concluindo-se que as características da zona do fundo do vale e um pouco da margem direita tiveram absorções mais elevadas do que nas demais.

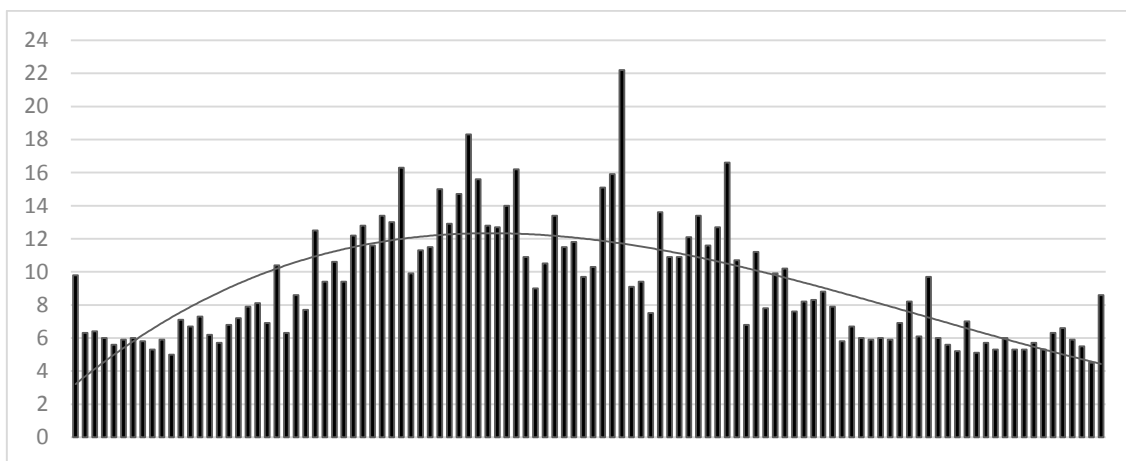


Figura 36 – Absorção de cimento em cada perfil de injeção de consolidação em Kg por metro de furo, representado num corte visto de jusante para montante da barragem

A partir da informação foi também possível contruir figuras, por perfil de injeção, que representam as absorções de cada um desses trechos e também as eventuais comunicações de água ou calda entre diferentes furos ou leques.

Pela sua análise concluiu-se que o comportamento da margem esquerda foi bastante bom, de um modo geral, apresentando absorções bastante baixas, excetuando trechos pontuais, apresentando também comunicações com pouca frequência sendo as existentes pouco importantes. A Figura 37 representa um perfil representativo desta zona da fundação.

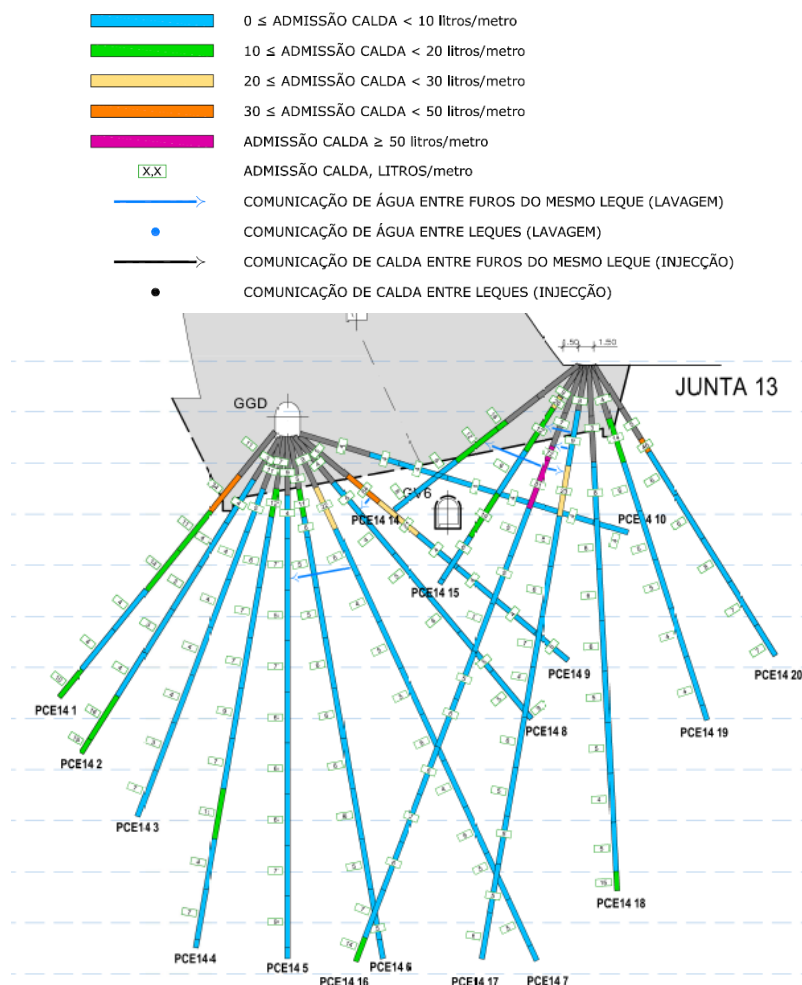


Figura 37 – Esquema resumo do tratamento de consolidação num dos perfis da Junta 13

O mesmo não se verificou na margem direita ou no fundo do vale, havendo nestas zonas, em especial nos furos que interseam as zonas de falha, registos de volumes da absorção de calda relativamente mais elevados. Estas foram frequentemente observadas em associação com comunicações entre furos e leques vizinhos chegando por vezes a percorrer distâncias da ordem das dezenas de metros.

Na Figura 38 está representado um perfil tipo da margem direita. Nesta margem também se verificou um comportamento nas injeções bom, no entanto verificou-se a com alguma frequência a existência de fraturação no maciço que conduziu a trechos de injeção com volumes relativamente elevados.

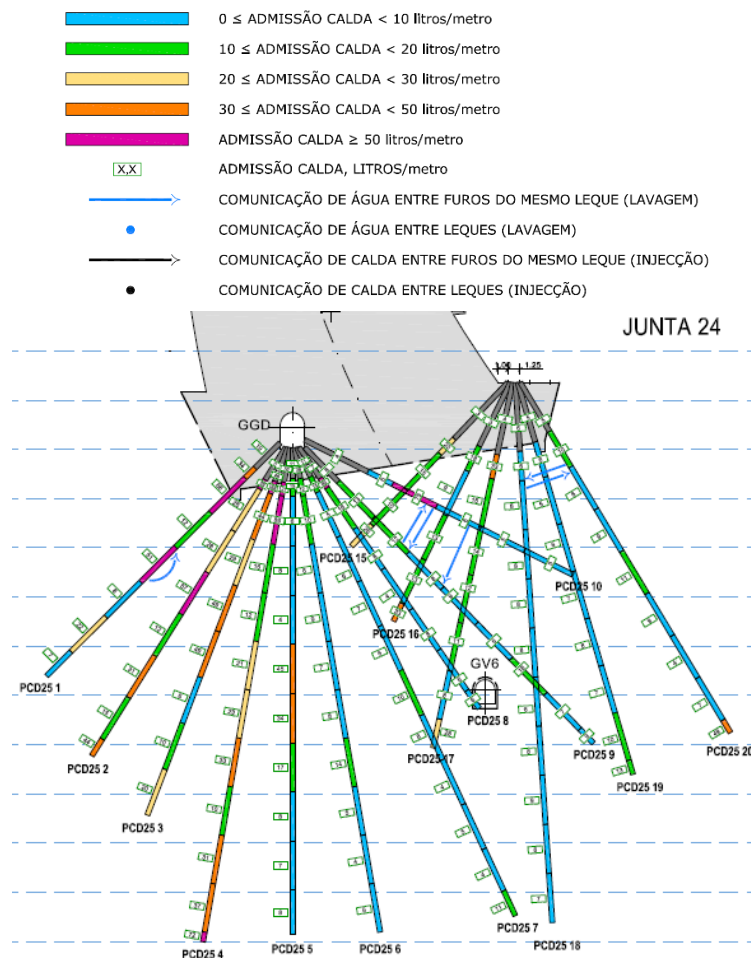


Figura 38 – Esquema resumo do tratamento de consolidação num dos perfis da Junta 24

A Figura 39 representa o tratamento de consolidação generalizada na zona do fundo do vale. Nesta região da fundação a magnitude dos consumos de calda, especialmente nas zonas próximas das falhas, levantou preocupações quanto à efetividade dos trabalhos de consolidação efetuados, ficando em aberto a necessidade futura de uma nova campanha de tratamento localizado para que se atinjam as características necessárias para a fundação.

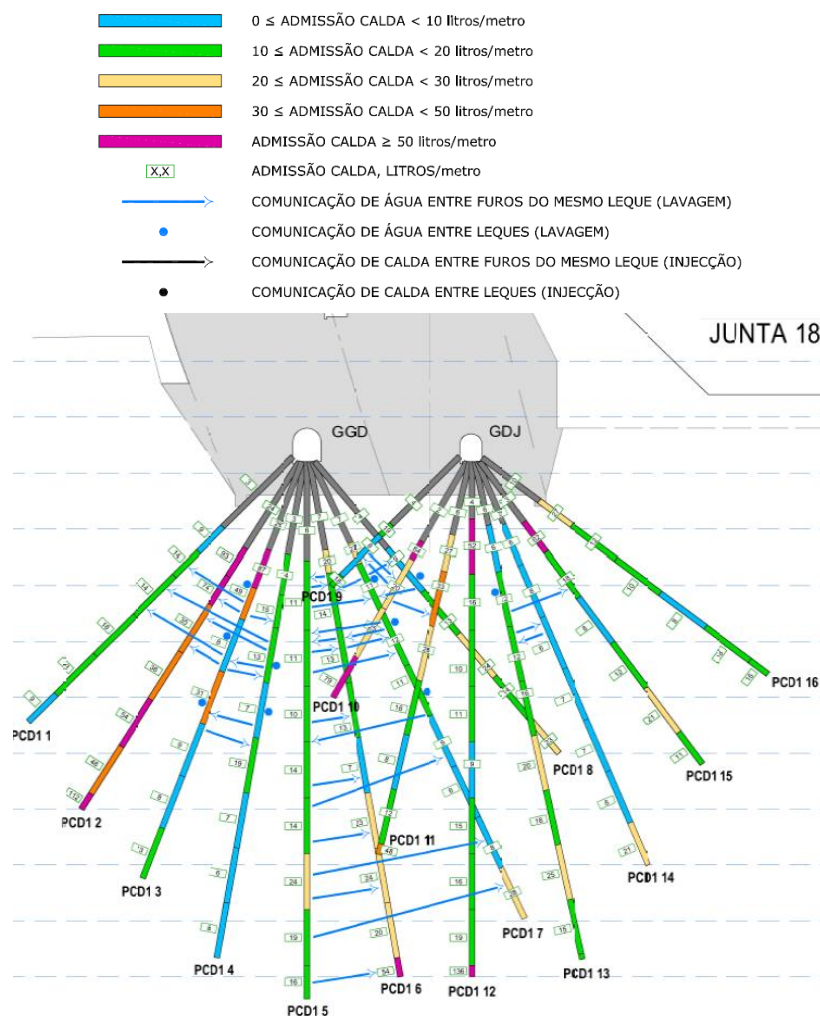


Figura 39 – Esquema resumo do tratamento de consolidação num dos perfis da Junta 18

Depois da conclusão do tratamento de consolidação pode-se começar com a execução da cortina de impermeabilização. As injeções realizadas para esse efeito foram feitas através do método split-spacing, ou seja, havendo maior quantidade de furação nas zonas em que o maciço apresenta uma permeabilidade acima do pretendido para a cortina.

Tabela 8 – Quantidade total de furação e massa de cimento injetada para a impermeabilização

	Margem Esquerda	Fundo do Vale	Margem Direita
Furação (m)	3169	5967	4841
Massa de cimento injetada (Kg)	18454	69033	24149
Massa de cimento injetada (Kg/m)	5,8	11,6	5,0

Pela análise dos dados da sua execução, tanto a quantidade de furos que foi necessária como os valores das absorções (Tabela 8), tal como tinha acontecido com os resultados das injeções para a consolidação, se conclui que a margem esquerda apresenta melhores características, ao ser possível construir a cortina com menor quantidade de furação e menor quantidade de cimento.

Na Figura 40 estão representadas as furações e as respetivas absorções, por trecho, das injeções que foram necessárias para a execução da cortina na margem esquerda. Logo à partida é clara a qualidade desta zona da fundação, pois não foi necessário recorrer a furação além da primária, salvo as exceções da região mais superior do encontro com a margem, onde não houve consolidação, e nos furos representados mais à direita da figura, que estão condicionados pelas falhas do fundo do vale. Quanto aos volumes de calda consumidos pelos trechos dos furos, é clara a predominância da cor azul, que representa o nível mais baixo de absorções, com as mesmas exceções referidas anteriormente.

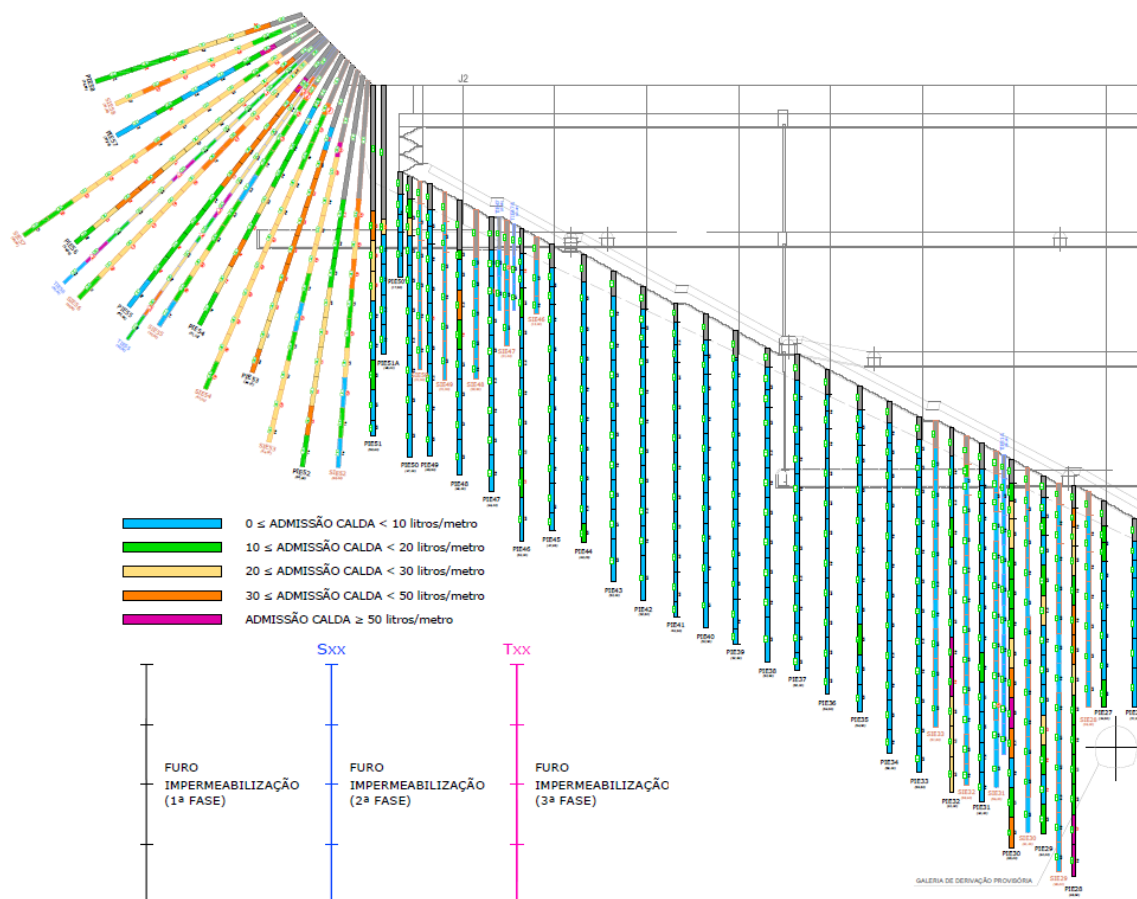


Figura 40 – Injeções da cortina de impermeabilização da margem esquerda (vista de montante para jusante)

A margem direita apresenta uma quantidade média de cimento injetada relativamente semelhante à esquerda, mas como se observa na Figura 41, a execução da cortina necessitou de uma

quantidade muito superior tanto de furação como de volume total de calda de cimento para que esta fosse concluída com sucesso diluindo então o valor médio de cimento colocado por metro de furo. Nesta margem foi necessário recorrer a injeções em furações secundárias ao longo de todo o seu desenvolvimento sendo que, em aproximadamente um terço deste, nas imediações das falhas, foi mesmo necessário recorrer a furações terciárias para que a condutividade hidráulica atingisse valores suficientemente baixos. Esta necessidade de furação adicional foi causada pelos elevados volumes absorvidos observados, em trechos pontuais espalhados um pouco por toda esta zona do maciço, como pode ser facilmente identificado na Figura 41.

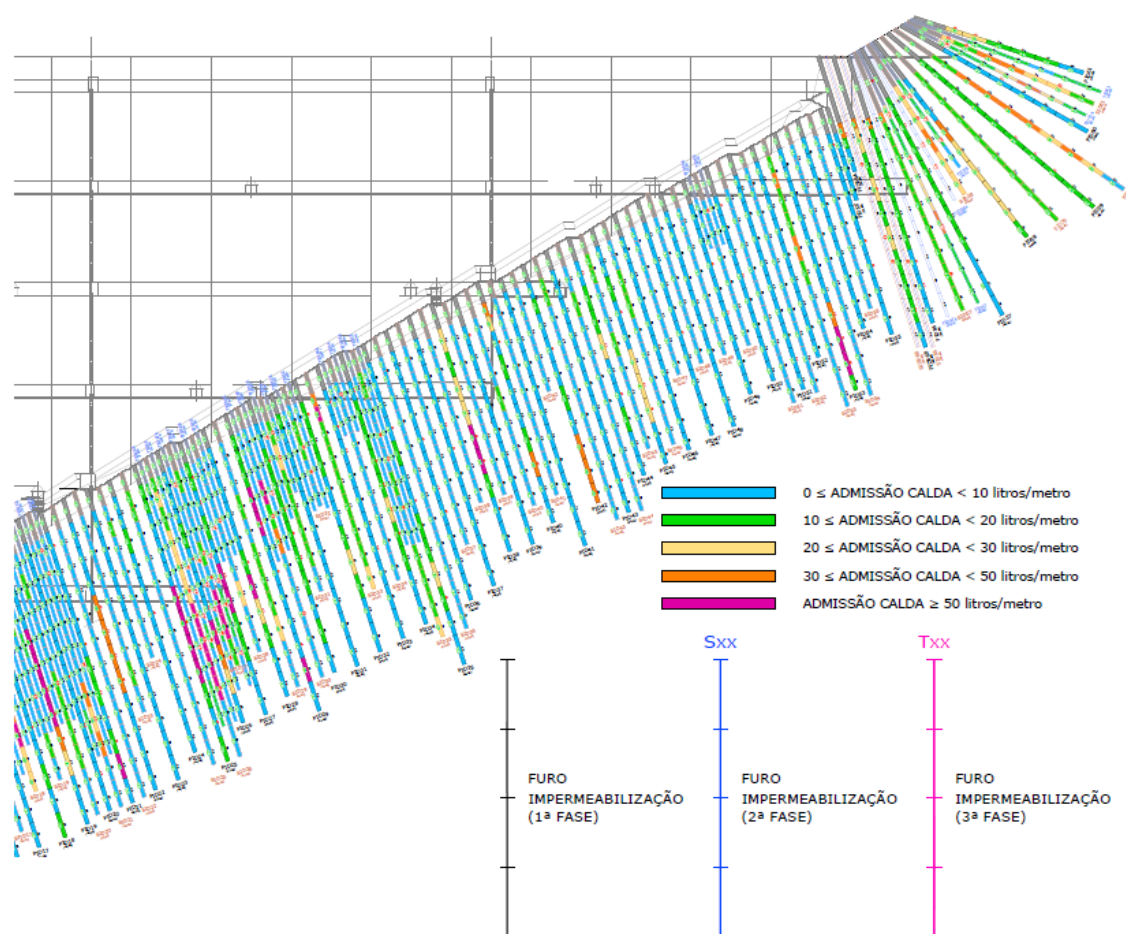


Figura 41 – Injeções da cortina de impermeabilização da margem direita (vista de montante para jusante)

Nas injeções de impermeabilização realizadas no fundo do vale foi necessário recorrer à realização de injeções terciárias ao longo de todo o seu desenvolvimento, dado que se registaram absorções muito elevadas nos furos primários e secundários.

Nesta zona da fundação da barragem, como se pode observar na Tabela 8, foram consumidas 69 toneladas de cimento para que se atingisse a permeabilidade máxima de 1 U.L.. Este consumo elevadíssimo deve-se essencialmente às absorções registadas em alguns furos da série primária e

da secundária interessando a zona central da fundação (zona das falhas) onde existe um cruzamento da furação representado na Figura 42. Destes furos destacam-se o furo PIE1 e o PIE3 que consumiram respectivamente 19,6 e 13 toneladas. No total a furação nesta região de cruzamento de furos consumiu 45.6 toneladas, ou seja, 40% de toda a quantidade de cimento colocado em toda a fundação para a cortina de impermeabilização.

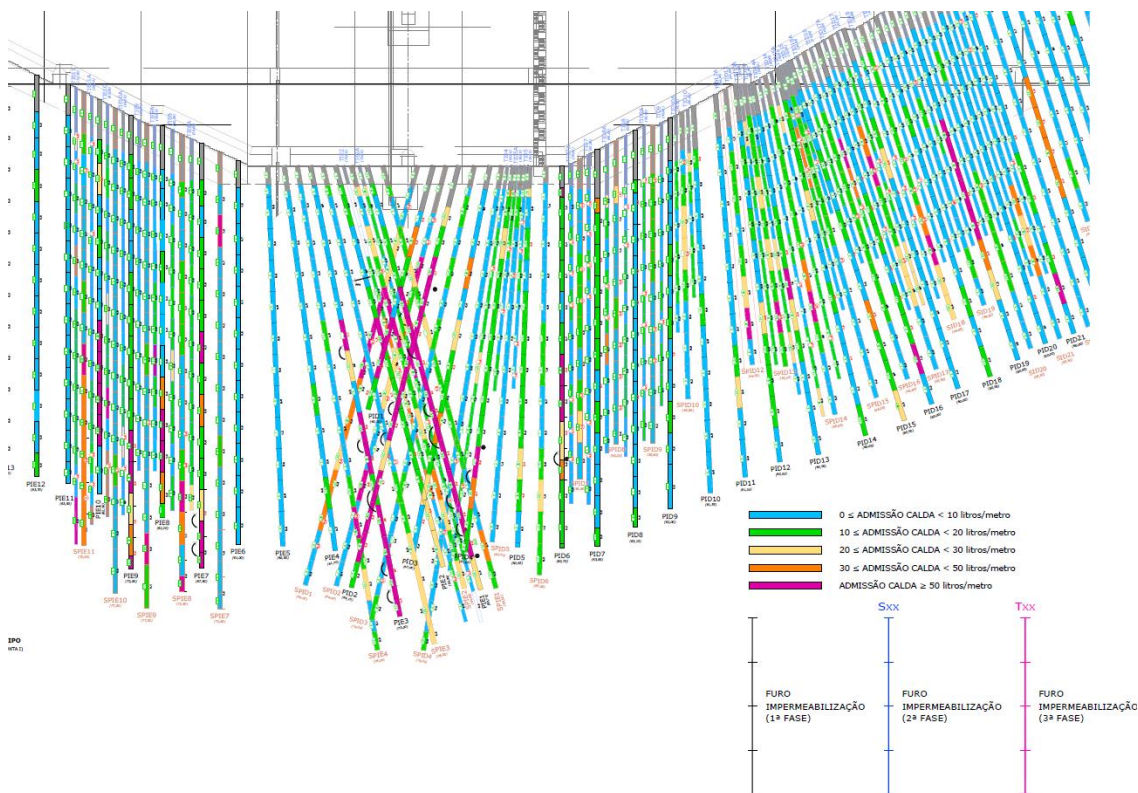


Figura 42 – Injeções da cortina de impermeabilização no fundo do vale (vista de montante para jusante)

Previamente à de qualquer trabalho por injeções, realizou-se uma campanha de tomografia sísmica através do método cross-hole com medição de velocidades das ondas longitudinais. A partir da informação obtida foi elaborado um perfil (Figura 43) onde se representa a qualidade do maciço fundação inalterado em função da velocidade de propagação das ondas sísmicas. Após a conclusão do tratamento foi realizada uma nova campanha com o objetivo de avaliar os tratamentos realizados.

Os valores da velocidade (V_p) que se registam no ensaio no maciço de fundação, podem-se relacionar diretamente com o seu grau de compacidade e integridade, tornando-se um indicador fiável da eficácia de qualquer tratamento de melhoramento ao serem avaliadas as alterações das velocidades antes e depois do tratamento.

Em maciços sãos e pouco fraturados a transmissão destas ondas sísmicas é feita com velocidades elevadas pois não existem interferências à sua propagação. No entanto, a propagação das ondas

sísmicas é cada vez mais lenta com maiores graus de alteração e frequência da fraturação da rocha de um maciço.

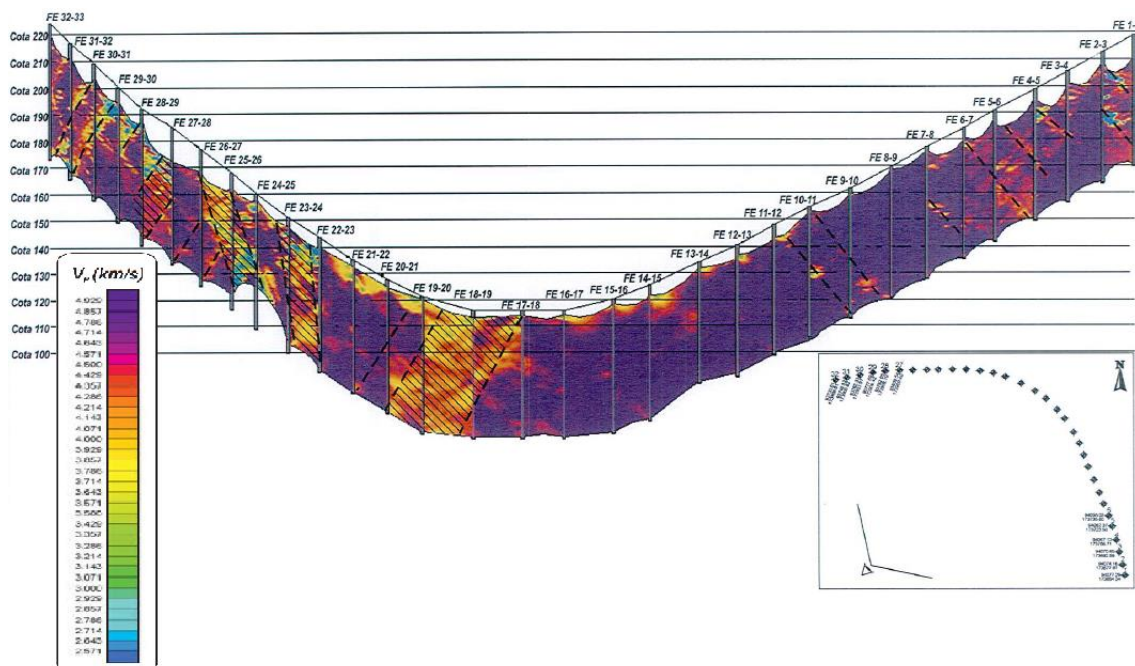


Figura 43 – Esquema resultante dos ensaios de cross-hole sísmico antes do tratamento (vista de jusante para montante)

Nos resultados da Figura 43, as velocidades baixas estão representadas em tons do espectro azul e as velocidades elevadas por tons roxos. Da sua análise conclui-se que a encosta esquerda do maciço teve de um modo geral muito boa qualidade, apresentando uma homogeneidade bastante boa com velocidades de propagação quase sempre superiores a 4,000 Km/s (velocidade representada pela cor amarela). Do outro lado do vale, a margem direita tinha o maciço perceptivelmente em pior estado, como mais tarde se veio a verificar nas injeções, e necessitou de uma muito maior quantidade de trabalho para atingir os objetivos pretendidos. No fundo do vale é visível a perturbação provocada pelas falhas longitudinais, que já haviam sido identificadas nos trabalhos de prospeção realizados inicialmente, no âmbito da escolha do local de construção e também nas escavações da fundação para a inserção da estrutura de betão.

Na execução da tomografia sísmica por ensaios de cross-hole, toda a furação foi feita com recuperação contínua de amostra acompanhada ainda pela realização de ensaios de Lugeon. Os resultados destes ensaios de absorção e do log geológico apresentaram, como era espectável, qualidade de resultados bastante inferiores na margem direita devido a trechos, identificados recorrendo aos tarolos recolhidos, com fraturação intensa muitas vezes acompanhados de preenchimentos e oxidação. Também no fundo do vale houve uma harmonia da informação, verificando-se valores da absorção notáveis chegando a ultrapassar 10 unidades de Lugeon, resultado da fraturação intensa aí existente.

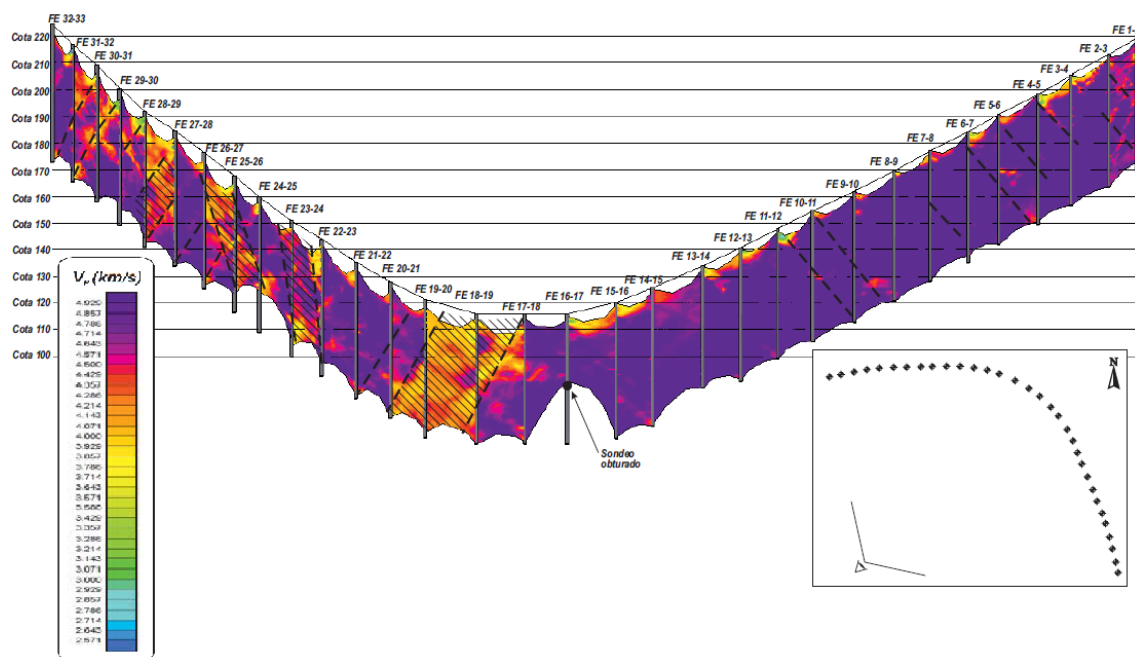


Figura 44 – Esquema resultante dos ensaios de cross-hole sísmico depois do tratamento de consolidação (vista de jusante para montante)

Foi realizada entretanto uma segunda campanha de ensaios com cross-hole. Esta apresenta o maciço após a conclusão dos tratamentos de consolidação, tendo como única exceção a região central, onde se situam as falhas, onde ainda não está fechado o processo de tratamento.

A partir da realização destes foi elaborado um novo perfil das velocidades de transmissão das ondas sísmicas (Figura 44) com o objetivo de possibilitar a comparação do maciço antes e depois dos tratamentos já finalizados.

Pela comparação das duas imagens, conclui-se que de um modo geral o tratamento melhorou as propriedades do maciço. Este facto pode-se constatar pela análise das regiões que apresentavam inicialmente velocidades muito reduzidas (espectro azul), no encontro da margem esquerda da fundação e um pouco por toda a margem direita, o surgimento destas zonas nos resultados é praticamente inexistente.

Apesar desta evolução positiva na generalidade do maciço, tal não é evidenciado na zona conturbada do fundo do vale, podendo-se até afirmar que, pelos resultados da tomografia sísmica, o tratamento não terá conduzido a uma melhoria significativa das características do maciço rochoso, permanecendo estas aparentemente inalteradas.

6

CONCLUSÕES

Nesta dissertação apresenta-se uma síntese do estado de arte do tratamento de fundações rochosas de barragens por injeções de calda à base de cimento. Nesse contexto, abordam-se os aspectos relacionados com o processo de tratamento, desde a concepção até à conclusão da execução, mencionando-se um pouco da sua evolução histórica, bem como as diferentes metodologias consagradas utilizadas atualmente um pouco por todo o mundo.

Numa breve síntese considerando os diferentes tipos de caldas de cimento e sua utilidade, verifica-se que a sua seleção é função das características pretendidas para a mesma. Serão diferentes conforme os objetivos pretendidos e adaptadas às características dos maciços onde são injetadas.

A caracterização geológica e geotécnica do maciço de fundação é indispensável para a definição de um tratamento eficaz e o correto dimensionamento da cortina de impermeabilização. Desta caracterização deve constar sobre o maciço de fundação da barragem um zonamento das características, a compartimentação, as tensões instaladas, a injetabilidade, a permeabilidade das formações que o constituem e a albufeira bem como os escoamentos que nele se poderão instalar, as suas propriedades mecânicas e dos taludes da albufeira situados imediatamente a jusante e ainda as propriedades mecânicas e hidráulicas dos materiais disponíveis nas zonas de empréstimo bem como o seu zonamento e avaliação dos volumes disponíveis para a construção da barragem.

Para o projeto do tratamento de uma fundação são realizados estudos de percolação tendo em conta a variação da permeabilidade com o estado de tensão e, portanto a abertura ou fecho das diáclases e outras descontinuidades, estudos da erosão devida à passagem de água e estudos de estabilidade da fundação. Para julgar a necessidade de cortina de impermeabilização usa-se o critério de Lugeon. Também deve ser sempre instalada uma cortina de drenagem com o objetivo de minimizar a subpressão na fundação. Os resultados dos estudos de estabilidade da fundação poderão mostrar a necessidade de medidas suplementares para garantir a segurança, tais como consolidações, pregagens e ancoragens.

Para além da condutividade hidráulica, o conhecimento adequado de outras características hidrogeológicas, como sejam o regime de percolação e comportamento das fraturas, possibilitam definir os critérios de fecho das injeções, ou seja, a observação de valores capazes de indicar que

foi obtida a redução da permeabilidade natural do maciço injetado até valores admissíveis, definidos pelo Projetista.

Estes critérios são vários, podendo basear-se quer na leitura da condutividade hidráulica do maciço ao longo das injeções, como prova que a permeabilidade deste se encontra realmente a diminuir, quer na leitura das quantidades de calda injetada por cada metro de furo, baseando-se no facto que uma menor absorção de calda geralmente traduz o fecho das discontinuidades existentes, que por sua vez podem significar a redução da permeabilidade do maciço.

O próximo passo no dimensionamento passa pela definição das dimensões da cortina de impermeabilização que se pretende realizar, como é o caso da profundidade a atingir, da extensão ao longo da qual esta será realizada, bem como do espaçamento entre os furos e as suas orientações. Embora haja outros métodos utilizados internacionalmente para definir o espaçamento entre furos, o mais utilizado é o de *split spacing*, utilizando-se os outros apenas em situações particulares.

A pressão de injeção é também definida, existindo diferentes correntes no que toca ao seu critério de seleção. A prática europeia defende o uso de pressões elevadas de modo a se obter um preenchimento adequado das fraturas, enquanto que a prática americana é apologista do uso de pressões mais baixas, de modo a evitar fenómenos de levantamento ou fraturação hidráulica. Cada uma destas abordagens tem as suas vantagens e cada autor defende a que considera mais apropriada. É de ressaltar que todos estes valores devem ser considerados como indicadores, existindo sempre a hipótese de realização dos acertos necessários a estes valores no decorrer da empreitada.

Os ensaios de injetabilidade são geralmente realizados apenas na fase construtiva, no início da execução da cortina de impermeabilização, e têm como objetivo permitir a adequação do (pré)dimensionamento das injeções de calda de cimento, bem como a escolha da formulação de calda mais adequada a utilizar. Com os dados obtidos a partir da execução destes ensaios num trecho piloto, também é possível realizar uma previsão do consumo de calda para a execução da cortina.

Na escolha da sequência de injeção é necessário ter em conta, para além das características do maciço, as características da calda adotada. Existem vários procedimentos disponíveis, sendo alguns mais seguros, como o caso do de injeção descendente, onde cada trecho injetado encontra-se sempre sob uma área do maciço já tratada no trecho anterior, permitindo assim a utilização de pressões de injeção mais elevadas, dificultando ao mesmo tempo a fuga de calda para a superfície. Contudo, existem também outros procedimentos mais rápidos e baratos, como o de injeção ascendente, onde o furo é realizado por completo e só depois injetado cada trecho. É no entanto necessário que o maciço apresente qualidade suficiente para que não exista o risco de colapso das paredes do furo.

No que toca ao controlo de qualidade, este tem de ser efetuado ao longo de todo o processo de tratamento. Antes do início da injeção este controlo passa pela análise das características das

caldas utilizadas através da execução de ensaios de laboratório e de campo, bem como de diagrfias ou em alternativa carotagem do furo, de modo a recolher a maior quantidade de informação possível, permitindo um eventual reajuste dos parâmetros de injeção e, portanto, do dimensionamento.

Numa segunda fase, durante a injeção dos furos, são verificados os parâmetros de injeção, pressão, volume de calda e caudal, bem como o controlo de possíveis fenómenos de fuga de calda para a superfície ou de levantamento hidráulico caso haja o risco devido a descontinuidades sub-horizontais, através de equipamentos instalados à superfície do terreno.

Para a verificação da eficiência do tratamento, e embora existam métodos que oferecem uma estimativa dessa eficácia, como é o caso da utilização de ensaios de absorção de água tipo Lugeon no decorrer das injeções, ou a realização de medições da velocidade de ondas sísmicas P e S, antes e depois do tratamento, o teste conclusivo decorre da observação dos drenos e dos piezómetros instalados ao longo da fundação da barragem que permitem monitorizar a percolação no decorrer e após o enchimento da albufeira.

Com o passar dos anos pode-se dar o caso de lavagem da calda constituinte da cortina, sendo necessária a reinjeção desta com elevados custos associados, daí que a eficiência de todo o processo que culmina na execução da cortina seja tão importante.

Devido à panóplia de parâmetros a contemplar no dimensionamento e da necessidade de eficiência da cortina executada, surgiram ao longo dos tempos várias metodologias, que visam englobar todos os aspetos descritos anteriormente, propostos por autores consagrados, tendo como base as suas experiências com o tratamento de maciços rochosos e execução de cortinas de impermeabilização.

Neste documento abordam-se duas metodologias diferentes, cada uma com diferentes campos de aplicação e eficiência demonstradas em obras por todo o mundo e com diferentes pontos de vista sobre o modo de obtenção dos parâmetros a definir. A metodologia mais utilizada é a proposta por Houlsby (1976; 1990), que defende a utilização de caldas progressivamente mais espessas, com o objetivo de injetar as descontinuidades mais fechadas, através do uso do método *split spacing*, e de pressões de injeção mais elevadas com o aumento da profundidade de injeção, dependendo também da qualidade do maciço, utilizando pressões mais reduzidas em maciços de pior qualidade. O volume de calda a utilizar depende da quantidade, persistência e abertura das descontinuidades a preencher no maciço rochoso, estimando-se este volume de vazios através dos ensaios de absorção de água tipo Lugeon.

Lombardi e Deere (1993) apresentaram o conceito do GIN à volta do qual desenvolveram uma metodologia. Segundo eles, a utilização do GIN, que consiste no produto do volume de calda injetada num trecho de 1 m com a pressão de injeção correspondente, aquando da paragem da injeção, em conjunto com a definição de limites de pressão de injeção e de volume de calda a injetar, permite prevenir completamente quaisquer fenómenos de levantamento ou fraturação hidráulica do maciço. Outro dos aspetos onde esta metodologia difere de todas as restantes é na

utilização de uma calda única, homogénea, adaptada com recurso a aditivos para apresentar as melhores características possíveis de modo a melhor se adaptar às condições do maciço.

Na barragem do escalão principal do Baixo Sabor a definição do tratamento foi feita com uma metodologia desenvolvida pela EDP, que incorpora diferentes aspetos das metodologias existentes.

Na fundação do escalão principal já foi concluída a fase de tratamento de consolidação, que inclui o tratamento localizado, o generalizado e a ligação betão-rocha. Também a execução da cortina de impermeabilização foi recentemente concluída, tendo sido também realizados os drenos e os piezómetros que são elementos essenciais para monitorização do comportamento da barragem. É então necessária uma análise mais atempada da informação retirada dos trabalhos de tratamento já concluídos e de possíveis desenvolvimentos futuros.

Especial atenção vai ser dada à evolução dos caudais drenados e às pressões que se vão instalar no maciço de fundação entre diversos patamares de enchimento da albufeira. Resultando daí a validação da eficiência do tratamento efetuado ou a necessidade de proceder a eventuais reforços de tratamento do maciço de fundação.

BIBLIOGRAFIA

- Bozovic, A. (1985). *Foundations treatment for control of seepage*. Proceedings of the XV Congress of the International Commission on Large Dams, Suisse, Lausanne, pag. 367-372.
- Bussey, W. H. (1973). *Suspension Grouts and Their Injection*. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 4 (vol. 10), pag. 313-323.
- Corven, J.; Moreton, A. (2004). *Post-Tensioning Tendon Instalation and Grouting Manual*. Florida, U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, pag. 172.
- Deere, D. U. (1976). *Dams on Rock Foundations – Some Design Questions*. In *American Society of Civil Engineers* (eds.), Rock Engineering for Foundations and Slopes Conference II, 15-18 August, Boulder, CO, pag. 55-86.
- Deere, D. U. (1982). *Cement-Bentonite Grouting for Dams*. Proceedings of the ASCE Specialty Conference in Grouting in Geotechnical Engineering, 10-12 February, New Orleans, LA, pag. 279-300
- Ewert, F. K. (2003). *Discussion of Rock Type Related Criteria for Curtain Grouting*. Proceedings of the Third International Conference on Grouting and Ground Improvement, Reston, VA. ASCE Special Publication No. 120
- Fell, R.; MacGregor, P.; Stapledon, D.; Bell, G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams*. Rotterdam, A. A. Balkema, pag. 912.
- Fortunato, Eduardo. *Apontamentos de Obras de Aterro*.
- Gama, P. S. S. (2012). *Injeção de caldas de cimento em fundações rochosas de barragens: Revisão crítica de metodologias*, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa.
- Houlsby, A. C., (1976). *Routine Interpretation of the Lugeon Water-test*. Quarterly Journal of Engineering Geology., 4 (vol. 9), pag.303-313.
- Houlsby, A. C. (1976). *Engineering of grout curtains to standards*. Journal of the Geotechnical Engineering Division of the American Society of Civil Engineers, 9, pag. 953-970.
- Houlsby, A. C., (1982). *Optimum Water Cement Ratios for Rock Grouting*. Proceedings of the ASCE Specialty Conference in Grouting in Geotechnical Engineering, 10-12 February, New Orleans (policopiado).
- Houlsby, A. C., (1990). *Construction and Design of Cement Grouting*. New York, John Wiley & Sons, Inc., pag. 468.
- Lima, Celso; Gomes, Topa; Menezes, José (2013). *Apontamentos de Geologia da Engenharia*.
- Lombardi, G. (1985). *The role of cohesion in cement grouting of rock*. Proceedings of the CIGB, Quinzième Congrès des Grands Barrages, Lausanne, Suisse, pag. 235-261.

- Lombardi, G.; Deere, D. (1993). *Grouting design and control using the GIN principle*. International Water Power & Dam Construction.
- Lombardi, G. (1996). *Selecting the grouting intensity*. International Water Power & Dam Construction, 4 (vol. 3), pag. 62-66.
- Lombardi, G. (1997). *GIN principle revisited*. International Water Power & Dam Construction, pag. 33-36.
- Manuel Rocha (1981), *Mecânica das rochas*. LNEC, Lisboa
- Nonveiller, E. (1970). *A rational approach to the design of grout curtains*. Proceedings of the 2nd International Congress on Rock Mechanics. Belgrade, Serbia, pag. 217-222.
- Normas de Projeto das Barragens (NPB) (1996)
- Quiñones-Rozo, C. (2001). *Lugeon Test Interpretation Revisited*. Proceedings of the 30th Annual USSD Conference, 12-16 April, Sacramento, CA, pag. 405-414.
- Quiñones-Rozo, *Lugeon Test Interpretation Revisited*. Proceedings of the 30th Annual USSD Conference, Sacramento, 2010.
- Sims, G. P.; Rainey, T. P. (1985). *Gitaru Da grouting*. Proceedings of the XV Congress of the International Commission on Large Dams, Suisse, Lausanne, pag. 1143-1166.
- Terzaghi, K.; Peck, R.; Peck, R.; Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice, Third Edition*. New York, J. Wiley & Sons., pag. 592.
- Warner, J. (2004). *Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock and Structures*, New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., pag. 632.
- Weaver, K. D. (2000). *A Critical look at use of "Rules of Thumb" for Selection of Grout Injection Pressures*. In Krizek, R. J.; Sharp, K.; ASCE (eds.), *Advances in Grouting and Groun Modification: Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000*, 5-8 August, Denver, CO, Geotechnical Special Publication No. 104, pag. 172-180.